朝永振一郎著作集

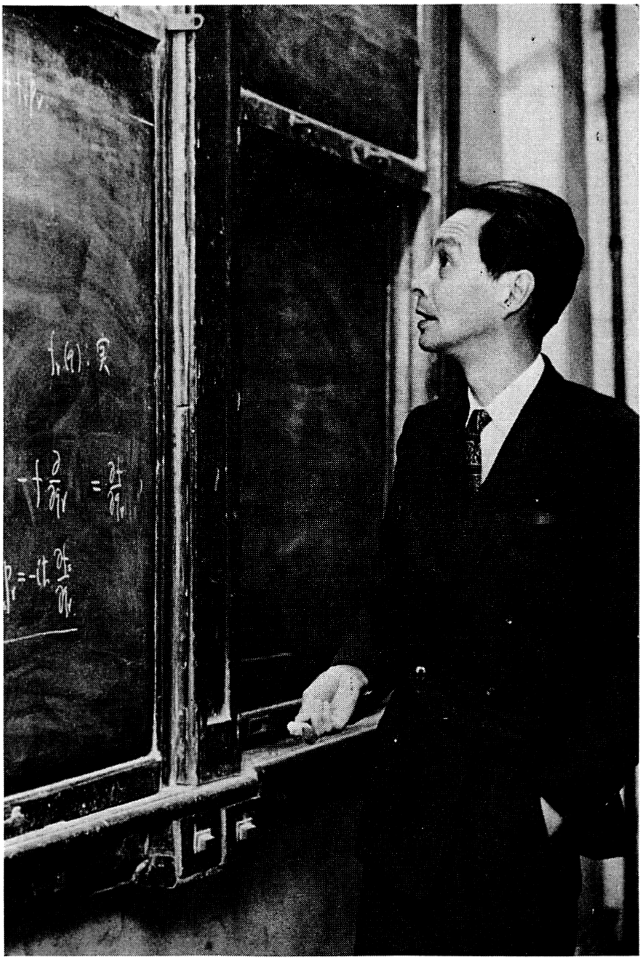
8

量子力学的世界像

牧 二郎解説



みすず書房



東京教育大学物理学教室にて，1960年（撮影 菊池俊吉）

朝永振一郎著作集

8

量子力学的世界像

牧 二郎解説

みすず書房

1982

目次

量子力学的世界像

量子力学的世界像

光子の裁判
——ある日の夢——

"We must now describe the photon as going partly into each of two components into which the incident beam is split."
P. A. M. Dirac, *Principle of Quantum Mechanics*

一

検「それでは被告にたずねるが、被告は前から室内にひそんでいたのではないというのであるか」

被「そうです。私がその直前に部屋の外にいたということには確かな証拠があります。現にその直前、私は門のところにいたのです。すなわちそこで門衛が私をつかまえて、入門の手続きをとらせたのであります。このことはさきほど門衛の証言で明らかにされたとおりです」

検「なるほど。門衛の証言によってその点についてはアリバイが成立しているとせねばなるまい。それでは聞くが、被告は門から前庭を通って窓のところに行き、その窓から室内に侵入し、そして室

内の壁のところで捕えられたというのだね」
被「そのとおりです」
気がつくと私は、何かの裁判を傍聴しているようです。法廷はよく写真などで見たように、正面に判事長が威儀を正して坐っており、中央の被告席には何の犯罪かよくわからないけれども、何かの犯行をおかしたらしい被告が神妙にひかえています。今尋問をしているのは検察官らしく、犯行の模様をいちいち念をおすように聞きだしているのです。
私は、いつのまにこんなところにやってきたのでありましょう。それをいぶかりながらも、これは何か面白い事件らしいぞと思いながら、一生懸命に聞き耳をたてていました。検察官はさらに尋問をつづけました。
検「その部屋には二つの窓が前庭にむいて並んでいる。被告はそのどちらの窓から侵入したのか。この点は非常に重要なことだから、はっきりと答弁してほしい」
これに対する被告の答は、はなはだ奇想天外なものでありました。
被「私は二つの窓の両方を一緒に通って室内に入ったのです」
私はこの答にあっけにとられました。一体、一人の被告が二つの窓の両方を一緒に通るなどということが可能でしょうか。検察官もこの論理を無視した答に少なからず心証を害したようです。
検「被告は二つの窓の両方を一緒に通ったと予審においても一度ならず主張していたが、ここで

またそれをいいはろうとするのか、そのような奇妙なことをいいはっても誰がそれを信ずるであろう。被告ははっきりとした不可分の一個体であって、未だかつて被告が同時に二つの異なる場所にいたなどという奇妙な状況におめにかかったものはない。しかもこのことは被告自身すでに認めたことである。なぜなら被告はさきほど門衛のところにいたから室内にはいなかったと称してアリバイを主張したではないか。被告が主張するように二つの窓の両方を一緒に通ることが出来るくらいなら、被告は門のところと室内の両方に一緒にいることも出来たはずである。それとも被告はこのアリバイの主張を引込めるつもりか」

なるほど、門のところにいたから室内にいなかったと被告が主張する以上、一方の窓を通ったなら他方の窓を通らないということを認めねばなりますまい。それだのに被告は両方一緒に通ったというのです。さすがに検察官だ、被告のすきを鋭くついたものだと私は感心しました。ところが、論理の矛盾をつかれてあわてると思った被告は少しも動じません。

被　「そうおっしゃっても私は二つの窓の両方を一緒に通って部屋に入ったのです。しかも私は前のアリバイを引込めるつもりもありません」

私はこの答弁を聞いて、一体被告は正気なのかしらと思いました。そしてこんなコルサコフ氏病めいた答弁をする被告はどんな顔のやつかと思って傍聴席からのり出して被告席をじっと見ました。ところで私は、今、被告がどんな顔をしていたか、どんな姿をしていたか、どうしても思い出せないの

です。とにかく被告は手錠のようなもので被告席につながれていたらしいこと、その席のあたりに何者かがいたということは、印象に残っています。しかしその他のこと、被告の姿や顔つきなどは、何一つ心に残っておりません。どうも考えてみるのに、被告は、その時からそもそも顔つきとか姿とかいう属性をもっていなかったのではないかという気もします。被告が波乃光子という女のような名前であったことを思い出しましたけれど、もちろん女であったか男であったかそんなことはわかりません。今考えると、この法廷の弁論のやりとりも現実の裁判を知っている人からみると、変なところがたくさんあったようです。

この非論理的な被告を検察官はもてあましたようです。どうにもがまんがならないという面持ちで彼はいいました。

検「よろしい、いつまでも被告がそんな論理に合わない主張を続けるならばそれはそれでよろしい。被告が認めようと否とにかかわらず、本官は被告が二つの窓のどちらか一方、しかして一方のみから室内に侵入したと断定する。なるほどこの本官の主張を被告は認めないし、また残念ながらこのことを直接現場においておさえた証人もない。しかし、さきほどもいったように、被告は門のところにいたという事実によって、室内にいなかったというアリバイを主張している。それならば、この本官の主張も同じ論拠によって正しいと断定されるべきである」

この検察官の主張はまことにもっともだと思いました。一体被告が窓Aのところにいたのならば窓

Bのところにいなかったことは明らかであるし、窓Bのところにいたのならば窓Aのところにいなかったことは明白なことではありませんか。

ところがこの時、初めて弁護人が発言を求めました。この弁護人の姿は今でもありありと思い浮べることが出来ます。ひょろ高いややねこぜの、もじゃもじゃとした髪の毛の男です。碧眼で鼻高く、明らかに日本人ではありません。きょろきょろした目の玉は少しいたずら小僧めいて、ちょろりちょろりとよく動きます。私はこういう姿の男をどこかで見たことがあったようです。

私は弁護人がきっと被告の精神鑑定を要求するにちがいないと思いました。さきほどからの被告の言説は正気の沙汰とは考えられませんでしたから。

ところがそうではありませんでした。まず彼はその部屋で被告をつかまえたという男にその時の状況をくわしく証言させました。証人のいうところはこうでした。彼はその時彼の同輩たちと部屋の中の、問題の窓にあい対している壁のところで何かの作業をしていたというのです。彼は疲れたので、しばらく仕事の手を休めてぼんやりとしていました。ところが突然、全く突然、彼に何者かが触れたので、びっくりしてそれをつかまえたというのです。こうしてこの証人は被告を捕えたのです。ここで弁護人は念をおして次のことを確かめました。すなわちこの証人も、またその時、室内にいた彼の同輩たちも、誰もがこの犯人がどこから来たかをみなかったということです。不思議なことですが、犯人がつかまるまで、誰もその姿をみたものはありませんでした。したがって彼が窓から入って来た

のか、前から部屋のどこかにかくれていたのか、これらの人々は証言することが出来ません。ただこの後の点については、門衛の証言がありましたので、犯人は初めから室内にいたのではなく窓から侵入してきたものとされ、被告自身もそれを認めたのです。弁護人はさらに門衛に証言を求め、彼は被告に入門手続きをさせたけれど、入門後、被告がどう歩いて行ったとか、いわんやどの窓から部屋に入ったとかの点については何も見ていないということをはっきりさせました。こうして、被告が二つの窓のどちらから入ってきたかということ、ないしは、被告がいいはるように、二つの窓の両方から入ってきたかということ、この点については誰も知っているものはないのです。とにかく、窓を通る現場を直接おさえた者は誰もないのだということを弁護人は重要な事実として指摘しました。

これだけの証言を行なわせた後、弁護人は驚くべきことばを発しました。すなわち彼は、論理に合わないことをいっているのは被告の方でなくて、まさに検察官の方であるというのです。「検察官の主張こそ、被告の正当な、論理の通った主張を全く無視し、誤った論理の上に自分の主張を強要するものであり、まさに被告の人権をじゅうりんした無茶苦茶なものである」というのです。

この発言に検察官はだまっているわけにいきません。ここで検察官と弁護人との間に火の出るような問答が交わされました。

検「それでは弁護人に承りたい。被告がAのところにいたならBのところにはいないこと、またBのところにいたならAのところにいないこと、これが本官の主張の前提である。この前提を弁護人

は否定されるのであるか。被告がA、B二つの場所に同時にいるなどということはあり得ない。この事実はすでに万人によって検証されていることではないか。しかして、さきほど本官が論じたように、被告がアリバイを主張した時、被告自身この前提の上に立っていたのである」

弁「本弁護人は検察官のその前提を決して否定はしない。いかにもこの前提は万人によって検証されている、と考えてよい。ただ、検察官がこの前提からただちに被告の主張を反駁するところに大きな論理の飛躍があるのである」

そして弁護人はさらにつづけました。

弁「被告がAのところにいたならばBのところにいない。この主張はたしかに検証された事実である。すなわち、Aに被告がいるという現場がおさえられた時に、被告が同時にBにおいておさえられたということは未だかつて一度もないという事実が、この主張の正しさを実証するのである。したがって、被告がアリバイを主張することは正しいことである。しかし、この重要な原則はそれが実際に検証された範囲内でのみ妥当するのであって、これを不当に広範囲に適用することは許されない。本弁護人のいおうとするところは、検察官の議論はこの原則の不当な適用に基づいている、ということである。

この原則を用いるにあたっては、よほどの注意を払わないと知らず知らずの間に不当な適用を行ないがちである。検察官の議論はまさにこの種の誤用の典型的な例である。このようなありがちの誤用

や混乱をさけるために、本弁護人はこの原則を次のように明瞭にいいかえた方がよいと思う。すなわち、被告がＡにいるという現場を何人かによっておさえられたならば、被告は他の場所Ｂには決していない、と断定してよろしい。事実この原則が検証されたのはこの意味においてであり、かつこの意味以上においてではない。

さて、そこで被告の場合を考えてみよう。被告が室内で捕えられる前に門のところにいたという事実、これは被告をつかまえて入門手続きを行なわせたという門衛によって証言されたところである。すなわち、その時、被告が門のところにいるという現場がこの門衛によっておさえられているのである。したがってこの場合われわれは原則を適用してただちに、その時、被告は室内にいなかった、と結論してよろしい。これが被告の主張するアリバイである。

次に被告が二つの窓、それをＡ、Ｂとよぶことにするが、この二つの窓のどちらを通ったかという問題にうつろう。検察官はさきに述べた原則を採用して、被告がＡを通ったならＢを通らなかったはずであり、また、被告がＢを通ったならＡを通らなかったはずである。したがって被告はＡとＢとの一方、しかしてただ一方だけを通ったはずであると主張する。しかし本弁護人はこの判断こそ重大な誤りであることを主張したい。すなわち、本弁護人がさきほどこの原則をより明確に表現しなおさねばならぬといったのはまさにこの種の誤りを避けるためである。そこでこの原則を正しい形でいいあらわしてみよう。それはこうである。被告がＡを通るところを何人かによっておさえられたなら、被

告は決してBを通ることはなく、また被告がBを通るところを何人かによっておさえられたなら、被告は決してAを通ることはない。ここで何人かによっておさえられたならばという点が重要である。すなわち、被告がA、Bのいずれか一方、しかしてただ一方しか通り得ないという主張は、被告がどちらかの窓を通る現場を、何人かによっておさえられた時に限って検証された事柄である。しかるに、さきほどの証言にあった如く、何人も被告が窓を通る現場をみたものはなかった。したがって検察官がこの原則を被告の場合に適用するのは、この原則の真であることが実証せられた範囲の外にまでそれを妥当せしめようとする不当の試みであって、明らかに検察官の越権である」

この弁護人の弁論は満場に大きな驚きを引き起したようです。いかにも理路は整然としています。しかし一方あまりにも実証を重んじすぎているのではないでしょうか。これでは現行犯ばかりが有罪だということになってしまって、いかなる判定も実際上行なうことは出来ないことにならないでしょうか。直接の証拠によらなければいかなる判定もしてはいけないという主張は、もちろん人権擁護の立場からいえば正当でしょうが、これはあまりにはなはだしい行きすぎではないでしょうか。

案の定、検察官はこの弁論を承服することは出来ません。

検「本官は弁護人のこの三百代言的な議論に承服することは出来ない。いかにも被告がAにいたところを見たものは誰もいないし、またBにいたところを見たものもない。しかして、AにいればBにいない、BにいればAにいないという原則が実証されたのは、いかにも弁護人のいわるる通り、目

撃者があった時においてのみである。しかしAにいてBにいない、という第一の可能性、BにいてAにいない、という第二の可能性、この二つの可能性以外に第三の可能性が存在したという事実も未だかつてそれをみたものはない。特に被告が二つの異なるところ、AおよびBに同時にいたなどいうことを誰もみたものはない。なるほど、実際の犯行の場合は、誰も目撃者がいなかったという点において、原則が実証されたところの場合とは異なっているかもしれない。しかし、だからといって、その時の被告の行動について第一、第二の二つの可能性以外の第三の可能性を考えねばならぬという弁護人の主張はあまりにも三百代言的である。被告が、ある状況のもとでは必ずかくかくの行為をなし、それ以外のいかなる行動をもなさない、ということがすでに実証されている時、たまたま目撃者がいなかったからとて、その同じ状況のもとで、その同じ行動がとられたと断定して何故に不当なのであるか。目撃者があるや否やは時の偶然であって、その差異はただ、被告の行動を知る人があるや否やにすぎない。弁護人のように、すべての判断は目撃者による実証によらなければならないものとし、いっさいの状況判断を否定するなら、そもそも裁判というものは成りたつであろうか。とにかく被告が不可分の個体であるという事実と、被告が二つの窓を一緒に通りぬけるという事実とは互いに矛盾した事柄であって、決して両立することの出来ないことは明らかである」

こうして検察官は、最後にとどめをさすように、もしも被告がその行動について第三の可能性、すなわち二つの場所、AとBとに同時にいることが出来るということをあくまで主張するなら、目撃者

の目の前でそれを示さねばならない、と鋭く被告と弁護人の方につめよりました。

これに対する弁護人の答はまた人を食ったものでありました。それは、第三の行動というものは、被告がそのおり場所を人に知られない時に限って可能なのであって、したがってこの第三の行動を行なう現場を人に見せよといわれてもそれは出来ない相談だというのです。

このひょうたん鯰(なまず)のような答弁には、検察官もむっとしたようです。満場の多くの人々も、私もその一人でしたが、この弁護人は法廷を侮辱するのかと思いました。しかし、さすがに判事長は冷静でありました。そしておもむろに口を切っていいました。

判「それでは弁護人、その弁護人のいわれることに果して証拠があるのであるか。誰も知る人のない時において被告が第三の行動をとることが出来る、ということを弁護人は主張したが、それは誰も知る人がないのではなかったか。それを弁護人はどうして知ったのであるか。ここで少なくとも弁護人は次の点を明らかにする必要があると本官は考える。すなわち、被告が不可分の一個体であるという事柄と、その被告が二つの窓を一緒に通りぬけ得るという事柄とが両立出来るという点を明らかにしてほしい」

さきほどから人を煙にまくような論法をならべていた弁護人も、これで参るかと思いきや、弁護人は一向にへこみませんでした。そして自信たっぷりにいいました。

弁「判事長ならびに満場の紳士諸君に申し上げる。いかにも、被告が二つの窓を同時に通りぬけ

るという奇妙な行動をとるのは、その現場を人に知られない時にかぎるのです。したがって、これを直接諸君にお目にかけることは残念ながら不可能である。しかし間接に、被告のあらゆる行動を通じての状況判断はそのことの真であることを諸君に示すでありましょう。検察官はさきほど本弁護人が事実による検証の一点ばりで、いっさいの状況判断を認めないようにいわれたのはとんでもない誤解である。本弁護人は決して単なる実証論者ではない。ただ状況判断はあくまであらゆる状況を注意深く観察して初めて下さるべきであって、狭い、あるいは不精密な経験によって得られた既成の概念によって無反省に下された独断であってはならない、と主張したいのであります。判事長の要求された証拠、すなわち、被告が二つの窓を同時に一緒に通りぬけたということを基礎づける事実をお示しすることは不可能ではありません。そのために本弁護人は実地検証を行なうこと、その他被告の行動について二、三の検証を行なうことをお許し願います。そうすれば本弁護人の下した状況判断こそ正当なものであって、検察官殿がさきほどからくりかえし主張された状況判断なるものがいかに既成の概念を無反省に用いた独断であるかが明らかになるでありましょう。そうして、被告が不可分の一個体であるということと、二つの窓を一緒に通りぬけるということとは、決して互いに矛盾した事柄ではないことが明らかになるでしょう」

この弁護人の請求はただちに入れられました。そしてこの法廷はここでいったん閉じることになり、一同どやどやと退廷しました。一人の被告が、同時に二つの異なった場所を通過出来るか否か、弁護

人と被告はそれが出来るというのです。そして、この常識では考えられない行動を、直接には見せられないが間接に示してくれようというのです。そうしてあの当然としか思えない検察官の判断が、誤りであることを明らかに示してくれようというのです。これはまさにみものではありませんか。実地検証で一体どんなことが起るでしょう。私は好奇心にもえております。読者諸君もおそらく同じ心で、早く実地検証の模様を話してくれといわれるでありましょう。

二

私たちはいつのまにか実地検証の場所におります。そこには大きな塀にかこまれた前庭をもった一軒の家がありました。この家は実地を一目で見えるように屋根がとり除かれ、われわれは塀の外に組まれたさじきの上から一望のもとに全体の情景を見得るようになっております。塀には狭い門が一つあいており、そこから前庭になり、その前庭をへだてて問題の家が建っています。この家の前庭に面した壁には、さきほどからやかましく論じられている二つの窓がうがたれています。この窓も門と同じように奇妙に細い形で、窓というよりすき間といった方がいいようです。家はたった一つの部屋から成り立っています。この部屋には二つの窓以外どこにも出入口がなく、家具も何もおいてないガランとした変なものです。ただ四方の壁のうち窓にあい対した壁面、そこで被告がとらえられたところの壁面は、何か特に印象的に見えております。この塀と門、門と前庭、前庭と窓、窓と部屋の関係を

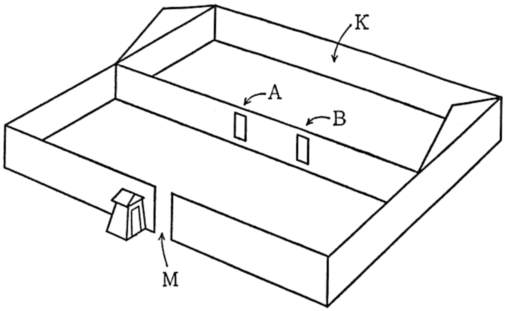


図1　M は門，A，B は窓，K は壁面.

示すために見とり図を画いておきましょう。二つの窓は図のA、Bとしてあるところです。図では、門をM、犯人がつかまえられた壁面をKとしておきます。

被告はまず門Mのところで門衛につかまって入門手続きをさせられ、そして最後に室内の壁面Kのところでつかまった、この二つのことは証言によって確実な事実であることがわかっているのです。この二つの事実の起った間、被告がどんな行動をとったかということが問題の中心であるわけです。

この時、判事長が立上っていよいよ実地検証を始めるむね宣しました。そして弁護人に向って発言をうながしました。そこで弁護人は立上って次のようにいいました。

弁　「本格的な実地検証を始める前に、私はまず予備的な検証をいくつか行なうことをここに提案する。その目的は、この被告の行動については既成の概念による判断がいかに誤りに導くかということを諸君にだんだんとわかっていただくためである。本弁護人は、さきほどからの検察官の判断がいかなる論理によってなされているかはよくわかっている。すなわち検察官の考えるところはこうであろう。被告は門Mから壁Kに至ったのであるが、その時、被告は(1)のような径路をたどったか、ある

いは(2)のような径路をたどったか、のどちらかであろう（この時、弁護人は黒板に大きく図2のような図をえがきました）。被告が同時に二つの異なる場所にいることの不可能なことはよく実証されているのであるから、この時、(3)のような径路を経ることは不可能である。もし被告が二つの窓を一緒に通ったと主張するなら、この第三の径路の可能性を目の前で見せねばならぬ。以上が検察官のみならずすべての方々の考え方であろう」

弁護人は黒板の上の図を指しながら論じました。そしてさらにつづけます。

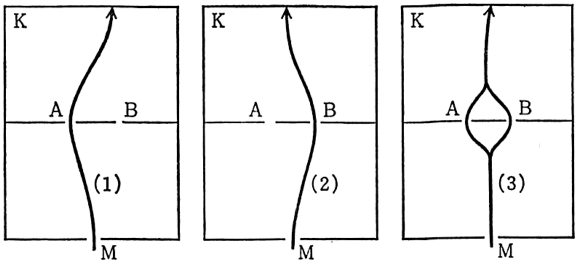


図2 想定される被告の足どり．K は壁．

弁「この考え方は、常識的にはまことに自明のようであるが、被告の行動を律する上でははなはだ適当でないことをまず検証によって諸君に示そうと思う。そこで次のような検証をまず行なってみることにしよう。すなわちまず被告を門のところにつれて来る。そしてここから彼を門の中に向って放ってみよう。被告は窓のある壁の方に向って放たれる。ただしこの時、被告を逃さないで再びつかまえるために、窓の壁に沿って警官をずらりとならべておいてほしい。そうすれば被告がどこへ来てもとり逃すことはない。門のところから放たれた被告は、壁のどこかのX点で警官の一人につかまるだろう。さて、この時

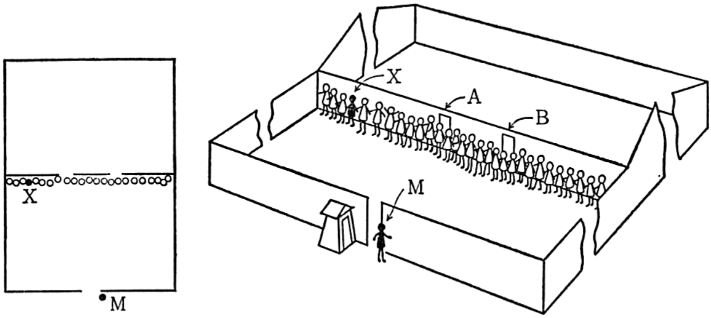


図3　警官の配列，黒坊は被告をとらえた者．左は平面図．白丸は警官の位置，そして黒丸は被告をとらえた警官を示す．

被告が門MからXに至る間において、どんな行動をとるかをご注意願いたい。常識的な考え方によれば、MからXにいたる何らかの径路に沿って被告は進んで行くと考えられる。しかし果してそうであろうか」

こうして多くの警官が窓のある壁に沿って立ちならびました。図3をごらんなさい。そして次に被告を入れた護送車が門のところにやって来ました。ここで護送車の口を門の方に向け、次にその戸を開き、出てくる被告を門衛がいったんとらえた上、窓の壁の方に向けてつき放つ、という段取りで検証が行なわれるのだということが説明されました。常識から判断すれば、そうして放たれた被告は前庭を横切って壁のところまでたどって行き、そこで警官の一人につかまるでしょう。こうして前庭の上にMからXにいたる一本の径路が定まるはずではありませんか。ところが弁護人の口調をまねると、「しかし、果してそうであろうか」です。そうでないとすれば一体どういう行動が可能なのでしょうか。

アッ！　護送車の戸が開かれ、出てきた被告を門衛がとらえました。――そして次の瞬間彼は被告を窓の壁の方に向ってつき放ちました。

私は体じゅうを目にして次に起る被告の行動を見まもりました。いや、見まもろうと思いました。被告のたどる径路を少しも見おとさないようにと目を皿のようにして緊張していたのです。ところがどうでしょう。門衛に放たれた瞬間、被告の姿は消えうせてしまったのです。姿のないものの径路などもちろんたどることは出来ません。私は事の意外さにまごまごしてしまいました。そうしてうろたえているうちに、立ちならんだ警官の一人がアッと声を上げました。被告が彼に触れたのです。そうして被告はその警官につかまりました。そうするとどうでしょう。そこに被告の姿が再び現れました。被告はたしかにそこにいるのです。

私はしばらく呆然としていました。満場の人々も、弁護人と被告とをのぞいて、誰もかれもびっくりして、しばしは息もつけないようでした。そのうちに誰もかれもおちついて来たようです。それと同時に、被告がMからXに行くのに何らかの径路をたどらねばならないという常識的判断も、なるほどこれで考えなおさねばならぬぞと、人々は思いはじめたようです。この検証はさらに二、三回続けて繰返されました。そうして繰返し繰返し同じ事態を見せつけられた人々は、なるほどこの奇妙な被告の行動を律するのに普通の判断を無反省に用いることは少々あぶないのかもしれない、と考えるようになりました。

ここで弁護人が立ち上りました。何らかの説明が彼によってなされると思いましたが、彼は簡単に、今の検証については何も説明を加えないでもご覧になったところで事情は明らかであろうといいました。この第一の検証によっては、ただ被告のいる場所とか、径路とかいう事柄について、とにかく既成の考え方は何らかの意味で改めねばならぬ、ということをここで悟っていただきたいのだと、簡単につけ加えました。そして彼は次に第二の検証を行ないたいといいました。

弁護人のいうところによりますと、この検証によって被告のたどる径路というものが何を意味するかわかってもらえるだろうというのです。そして、この検証法をキリバコ法と名づけるのだと彼はつけ加えました。

キリバコ法というのは次のようなものでした。弁護人はまず前庭と室内一ぱいに警官を立ちならばせました。そして、それらの警官にむかっていうのには「私は被告を門のところから窓の壁にむかって放たせる。そうすると被告は門から壁にいたる間で諸君のだれかに触れるだろう。そこで諸君が被告に触れたら軽くこれをとらえて（しっかりと捕獲してしまわずに）すぐに被告を放ちなさい」と。

さて、こうして前庭と室内一ぱいに立ちならんだ警官を前にして、前の検証の時と同じ手続きで被告が門のところから壁にむかって放たれました。放たれるや否や被告の姿が消えうせたことも前と同じです。しかし今度は警官が前庭一ぱいにたむろしていましたので、前の場合と異なって、被告は早速門の近いところの警官に触れたようです。ここでこの警官は被告をつかまえ、被告はその姿をここ

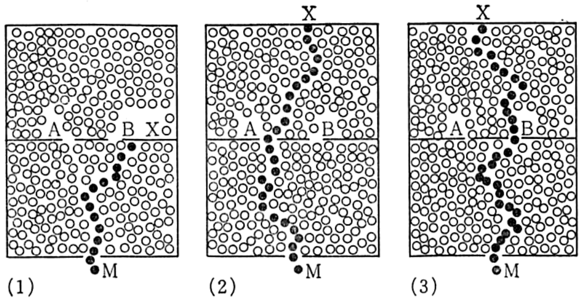


図4　キリバコ法によって示された被告の足どり．黒丸は被告をとらえた警官の位置．

で現しました。彼は現にそこにいるのです。次に警官は、命ぜられた通り被告を放しましたので、再びその姿は消えました。しかし、ただちにまた別の警官によってつかまえられ、その姿を現し、次に放されてまた消えうせました。こうしたことが次々と行なわれ、ついに被告は窓の壁のところに達し、ここで最後に警官につかまって姿を現しました。

ところで、ごらんなさい。こうして次々と被告がその姿を現して行った場所をつづって行くと、一本の径路がはっきりとたどれるではありませんか。そうです、一本のです。図4の(1)はその一例です。図の丸は警官の立っていた場所を意味しますが、そのうちの黒丸は被告が次々にとらえられて姿を現して行った場所を示します。この検証は再び何回もくりかえされましたが、こうしてたどられた径路は必ず一本でありました。これが二本にわかれたりしたことは一度もありませんでした。なるほど径路というものがこうした意味のものならば、それが二本にわかれることは決してないはずでした。なぜならわれわれが前に確認した原則によれば、被告が一つの場所にいることが警官の一人によってつかまれた以上、ほかの場所に被告のいることはあり得ないからです。径

路というものがこの意味であるなら、図2の(3)のようなものはあり得ないわけです。

何回かくり返して行なったこの検証のうちで特に注目すべきものは、被告が前庭から次々にとらえられて行くうちに、ちょうどうまく窓の所に来た場合です。この時は窓の所にいた警官が彼をとらえてそれを放ちますと、被告は次に室内の警官に捕えられ、そして次々と進んで室内のうしろ壁の所まで達します。図4の(2)と(3)はそういう場合の径路の例です。(2)ではその径路が窓Aを通っていますし、(3)では窓Bを通っています。しかし、この場合にも径路はいつも一本であって、したがって被告は決して二つの窓を通るようなことはありません。いつでも通るのはAの方かBの方かの一方、しかしてただ一方です。

この検証を終って弁護人はいいました。

弁「以上の検証を通じて満場の諸君に明らかになったことは、被告の径路というものがこういう意味のものであるなら、いかにも『径路は決して二本に分れることがない、したがって検察官の主張は正しい』ということである。しかし実際の犯行のときの状況は今検証の行なわれたその状況と全く異なっていることをご注意願いたい。すなわち、犯行のときには、前庭にも室内にもまたいずれの窓のところにも、被告をとっつかまえた警官などは一人もいなかったのである。したがって、被告は門のところと、室内のうしろ壁の所で姿を現した以外のどこでも姿を現していなかったのである。したがって、そのとき前庭から室内にいたる間、今の検証の場合と同様にある一本の径路をたどったと断

定をする根拠は何もないのである」

この弁護人の発言に対して検察官は次のように反駁しました。

検 「いま弁護人のいわれたことは、すでに前から論じられたことの繰返しにすぎなく、その論旨に何らの新味もない。弁護人は、前庭にも室内にも被告を捕まえた警官がいなかったという理由によって、その時、被告がある径路をたどったという断定は出来ないと主張する。しかし本官はあえていう。なるほど、捕獲されない間はその姿を示さないという被告の行動はまさに本官の意表外の出来事であった。しかし、被告は捕えられて姿を現す時は、いつもかつ例外なしに、一つ、しかしてただ一つの場所にいるのである。しかしてこの時、この警官を物かげにかくしておいて、前もって警官のいることを被告に何ら通告することなく、不意にこの警官をして被告を捕えしめた場合もやはりそうである。不意の、何ら事前の通告を行なわない臨検においてある人がいつもある行動を示すなら、その人は、監視されていない時にも、やはりその行動を行なっているとの判断は、全く科学的なものであって、これをもし独断として排斥するならばおよそいかなる判断も成立しないのである。要するに本官は、不意の、事前通告を行なわない臨検によって被告がいつも一つ、しかしてただ一つの場所にいるということが例外なく認められている以上、被告がその姿を見せない、したがってそのおり場所が人に知られない場合といえども、どこか一つ、しかしてただ一つの場所にいると判断する。ただ、その時、被告がどこにいるかを知る人がないだけである」

こういって、検察官は警官を物かげにかくしておく場合の検証を必要があれば行なってみようといいました。しかし弁護人はその必要はないと答えました。なぜなら、この時、検察官の主張する通りのことが起ることをすでに十分認めるから、というのです。すなわち、事前に通告しない不意の臨検の場合でも被告が二つの場所でつかまるような事実は決して起らない、ということを弁護人は実証によってすでに認めているからです。

ここで、長い間検察官と弁護人との間の議論をだまって聞いていた判事長が口を出しました。

判「本官には検察官の主張はまことにもっともに思われる。事前に通告しない不意の臨検を行なったとき、被告は決して二つの場所でつかまるようなことはなかったとすれば、誰にも見られない場合にも彼はその通りであると判断することは全く妥当だと思うが」

この判事長の発言に対し弁護人は、どうも弱ったという顔つきをしながら、

弁「判事長までがさような速断をなされては、はなはだ困ります」

といって満場を失笑させました。そして続いていいました。

弁「判事長および検察官の主張には一つの大きな仮定が含まれていることにご注意申上げたい。そうすれば今のような速断は出ないはずである。さきほどから主張されていることは、事前通告のない不意の臨検によっていつも同一の行動が示されるならば、臨検のない場合にもその行動がとられているはずだということである。なるほど、事前通告がないということは、この時重要なことである。

例えば、臨検をするぞ、と前もって通告された時、悪事をしたことがないからといって、見る人のない時その人が悪事をしないとは判定し得ないこと、これは明らかである。しかし、この種の判定を行なうにあたって通告がないという事柄だけでは実は決して十分ではないのである。なぜなら臨検を行なうことそのことがその人に影響してその行動に何らかの変化を与えているかもしれないからである。事前の通告がなくとも、臨検行為それ自身がその人に影響して、その行動に変化を与えるとすれば、臨検を行なったときの行動をもって、それを行なわなかったときの行動をトすることは出来ない。闇列車を臨検して闇屋をしらべるときには、その臨検によってその闇屋のかくしもっていた闇米が消えてなくなることはない。すなわちこのとき臨検行為は決して闇米に影響してその有無に変化を与えることはない。それ故、この臨検による判定は適切である。しかし被告波乃光子のおり場所をしらべる場合はどうであろうか。被告のおり場所をしらべるには、被告を何人かが捕えねばならぬことは何回もくりかえした実地検証の結果おわかりであろう。この時、彼を捕えるというそうしたことは相当手荒な仕事である。この手荒な仕事によって被告の行動が何らかの意味で影響を受け変化させられないということは誰が保証し得ようか。この点が、世間一般の犯罪人と被告波乃光子と異なるところである。世間一般の犯罪人であったなら、そのおり場所を知るのに何も彼を捕える必要はない。ひそかに彼を見ればよい。念を入れるならば、面通しを行なうときによくやるように、半鍍金の窓から犯人には少しも知られないようにしてそのおり場所を知ることが出来る。そうすれば、この臨検は犯人に何

の影響も与えず、したがってその行為には何の変化も与えないわけである。この事実があればこそ、通常の犯罪人を対象とする場合なら、誰も姿を見たものはなくとも、どこか一つの場所にいると断定してもよかろうし、したがって、通常の犯罪人ならば二つの窓を二つとも通りぬけたなどといい張っても、それには本弁護人といえども承服はしないのである」

こういって弁護人は、通常の常識的な判断の根本には、被告のおり場所を定めるために行なう臨検を、それが被告の行動に何の影響も与えないようにひそかに行なうことが出来る、という仮定が横たわっているのだということを明らかにしました。しかしてこの仮定が許されるならば、すべてのことは検察官のいう通りであるのだが、もしこの仮定が成り立っていないなら、どう論理をひねっても検察官の主張が必然的な唯一のものだとはいえない、というのです。こうして、一見両立することの出来ないような二つの主張、すなわち被告が不可分の一個体であるという主張と、二つの窓の二つとも一緒に通りぬけ得るという主張とが、何も矛盾なく成立し得るというのです。

この議論は人々を傾聴させました。ここで判事長は再び発言しました。

判「なるほど、弁護人のいうところが大分わかって来たような気がする。これでどうやら問題のありかが大分はっきりして来たように思われる。いかにも弁護人のいうように、被告波乃光子のおり場所は、これを捕えるというような相当手荒いことをしなければわからないのであるから、それが被告の行動に影響を与えて、それを変化させることもあるかもしれない。しかし、こういう手荒いこと

をしても、必ずしも影響を与えて、その行動を変化させるとの断言も出来ないように思われるし、またそういう影響があるにしても、二つの窓を二つとも通ったという主張はまだ積極的に証明されてはいない。すなわち、弁護人のこれまでの議論で明らかになったことは、キリバコ法などで明るみに出された被告の行為をもって、その姿を見せない時の行動をトすることは必ずしも出来ないという点である。しかし、必ずしも出来ないことが明らかになっても、必ず出来ないということはまだ明らかでない。もう一度いうと、姿を見せない時に、『見えないけれど、やはり一本の径路を通っているのだ』という断定は必ずしも出来ないことは明らかになった。しかし、その時一本の径路を通っていると考えてはいけないという結論はまだ出てこない。不可分の一個体が二つの窓を通りぬけるなどという、一見互いに両立し得ない矛盾を含んだような事柄も必ずしも矛盾ではないということが明らかになったが、実際にそうであるということは、まだいえない。そこで弁護人にこの主張の積極的な根拠になるような証明を要求しなければならない」

これに対して弁護人は、さらに被告の行動について別の検証を行ないたいむねを要求しました。しかし、大分長い間の緊張した議論で一同は大分疲れを感じております。そこで判事長は一同の希望によってしばしの休憩を宣しました。おそらく読者諸君も同様におつかれのことでしょう。私も筆を持つ手がいたくなりましたので、ここでちょっと一服いたします。

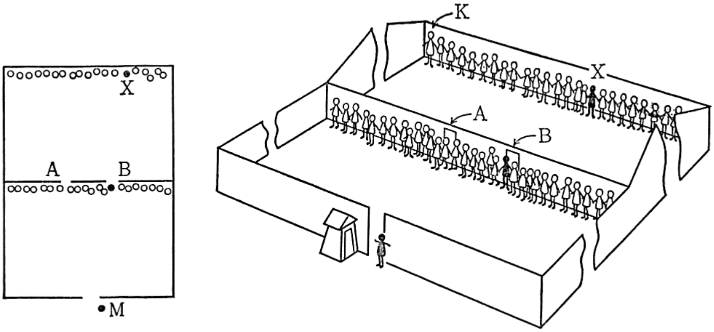


図5　警官の配列．黒坊は被告をとらえた者，被告は門から窓Bを通り，壁のXの位置までやって来ている．

三

休憩のあとの検証はまたずいぶんと大がかりなものでした。弁護人の指図によって二つの検証が行なわれましたが、そのどちらも相当な時間を要しました。

まず第一の検証は次のようにして行なわれました。弁護人は図5のように門のところに門衛を立たせ、窓の壁にそって、二つの窓A、Bのところにすき間なく、また室内のうしろ壁のところにずらりと警官を立ち並ばせました。窓のところの警官は、被告がどちらの窓を通るかを調べる役目をおおせつかったので、この二人は被告を軽く捕えてすぐ放つよう命ぜられています。窓の壁のところの他の警官は、被告がうまく窓のところへ来なかった時に、それを捕える役目です。室内のうしろ壁のところの警官は、室内に入った被告を最後につかまえる役目をするのですが、彼らの誰が被告を捕えたかということ、いいかえれば被告がこのうしろ壁のどの位置にやって来たかということをい

ちいち記録しておくことを命ぜられました。

こうした人員配置を行なっておいて、被告は前の検証の時と同様、門衛によって門のところから内庭に向けて放たれます。そうすると被告はある時は窓の壁のどこかへやって来てつかまり、ある時はちょうどうまく窓AまたはBのどちらかのところにやって来てここで軽く捕まります。その時は被告はただちに放たれて後、室内のうしろ壁のどこかで捕獲されます。しかしてこの時、うしろ壁のどの位置に彼がやって来たかがいちいち記録に止められます。

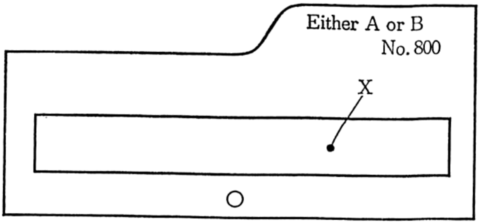


図6　カード "Either A or B". 壁K上で被告のとらえられた位置を示すもの.

この検証は何百回となく繰返し行なわれました。ここでも前述の確認された原則はやはり成立していて、被告が窓Aのところに来た時は決して窓Bのところに来ないこと、またBに来た時は決してAには来ないこと、が再確認されたことはいうまでもありません。

この時、室内のうしろ壁のどこで最後に被告が捕獲されたかというデータは図6で示されるようなカードの上にいちいち記録されました。このカードには "Either A or B" という記号がつけられていますが、それは、被告が窓Aまたは窓Bのどちらかで捕えられた場合のデータであることを意味します。カードの番号はそれが何番目のデータであるかを示します。カードの上の黒点がすなわち壁の上で被告がつかまった位置

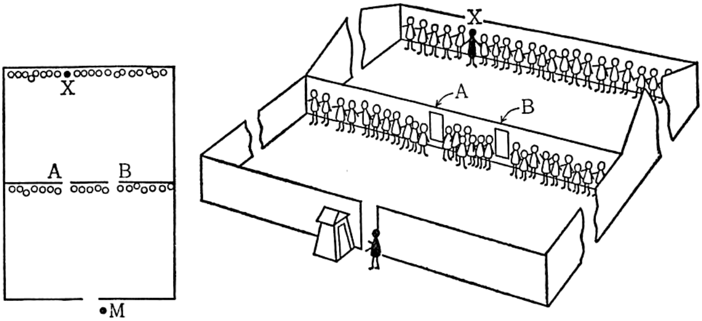


図 7　警官の配列．今度は二つの窓のところに警官をおかない．

を示すのです。

こうしたデータがたくさんに作られ、カードの山がうず高く出来た後、今度は第二の検証に移ります。

第二の検証が第一のそれと違う点は、今度は窓Aと窓Bのところの警官が取りのぞかれたことです。図7をごらん下さい。弁護人の言によりますと、これでちょうど犯行の現場と同じ状況になっているのだそうです。犯行の現場では窓A、Bのところに警官がいなかったのみならず、窓の壁の他のところにも誰もいなかったわけですが、この差異は本質的なものではなく、今の場合、被告がちょうど窓を通りぬけなかった時に彼を取り逃しては困るからそこに警官をならべたにすぎないのです。この検証では窓のところに誰もいませんから、被告が窓を通るところをおさえる何者もいないわけで、この点、本質的には犯行の現場と一致するわけです。

こうして第一の検証と同様に、被告は門の所から放たれ、そうしてうまく室内に入った時には、うしろ壁のどこかで捕獲されま

した。そして、その時うしろ壁のどの位置に被告がやって来たかが、いちいち記録されました。

この検証も何百回となく繰返され、うしろ壁の上で被告の捕獲された位置が図8のようなカードに記録されました。このカードには"Neither A nor B"という記号がついています。それは、この時被告はA、Bのどちらの窓でも捕えられていなかったということを意味します。

さてこれで検証は一段落つきました。このカードにとられた記録から弁護人は彼の結論を導き出そうというのです。

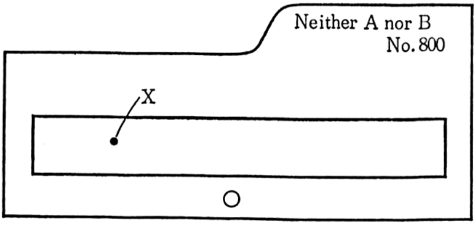


図8 カード"Neither A nor B".

弁護人は立ち上っていいました。

弁「さて、ここでわれわれは、被告の行動について二組に分類されたデータを得ました。第一のものは"Either A or B"というデータであり、第二のものは"Neither A nor B"というデータです。第一のものは被告が窓のところで捕えられ、したがって窓Aか窓Bかのいずれか一方、しかしてただ一方を通過する現場をおさえられた時のものであり、第二の方は窓のところで被告は捕えられることなく、したがって窓を通る時全く姿を現さなかった時のものであります。さて、検察官の主張されるところによれば、この後の場合、すなわち被告がその姿を現さないで窓を通過した場合においても、彼が姿を現して通過した場合と全く同じ行動をしているべ

きだ、ということになる。この主張が正しいか否かはわれわれが今行なった二種類のデータを比べてみれば明らかである。もし検察官の主張が正しいなら、"Either A or B" の組のデータも "Neither A nor B" の組のデータも全く同じでなければならない。そこでわれわれはこれを調べてみることにしよう」

こういって弁護人は、このおのおのの組のカード上の黒点をおのおの一枚の紙の上に写させました。すなわち弁護人は二枚の大きな紙をひろげさせ、一方には "Either A or B" のカード上の点を、他方には "Neither A nor B" のカード上の点を、次々とマークさせて行きました。われわれは提示されている大きな白い紙の上に次々と黒点が打たれて行くのを興味をもって見ていました。初めのうちは "Either A or B" の方の紙の上の黒点も "Neither A nor B" の方の紙の上の黒点もバラバラの不規則な点の集りのように見え、両方の組の間に大した差異もないように見えました。しかし、次々に黒点が書き加えられて行くにつれて次第に差異らしいものが現れ出しました。そして、数十、数百の点がマークされた頃には、はっきりとこの差異がわかってきたではありませんか。

二枚の紙の上の黒点の群は図9と図10に示したようなものになりまして、"Either A or B" の方の点のならび方と "Neither A nor B" の方のそれとは一見して異なっています。すなわち前者の方では黒点は紙上一面にほぼ均一にばらまかれているのに、後者の方では黒点の密な所と粗な所と交互に現れて、規則正しい縞模様を作っているではありませんか。特にこの縞目の中に、点の粗な所の中心には、点が一つもやって来ない場所があります（図の上では0というマークで指摘しておきました）。

すなわちこの場所に被告は決してやってこないのです。弁護人はこの二枚の紙上の点の群りを指示しながらいいました。

弁「諸君ごらん下さい。ここに"Either A or B"と"Neither A nor B"とのそれぞれの場合について、被告がやって来ることの出来た位置を示す点の群れが得られました。この二つの点の群れを比べると明瞭な差異に気がつかれるでしょう。すなわち、この点の群り方をみると"Either A or B"の時には、被告はうしろ壁のどの位置にもやって来られたのに対し"Neither A nor B"の時には、やって来やすい位置と来にくい位置とが存在していて、それが交互に縞模様をなしていることがわかる。特に文字0でマークした位置には被告は決して来ることが出来ないのである。このことは、『被告が窓の所で捕えられず、したがってそこで姿を現さなかった場合においても、そこで捕えられて姿を現した時と全く同じ行動をしている』という検察官の判定を、明らかに覆えす事実である。したがって、『窓の所で姿を現さなかった時にも、

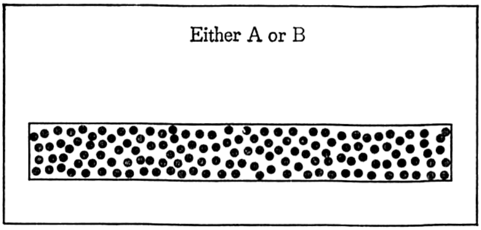


図9　カード"Either A or B"上の点の集り.

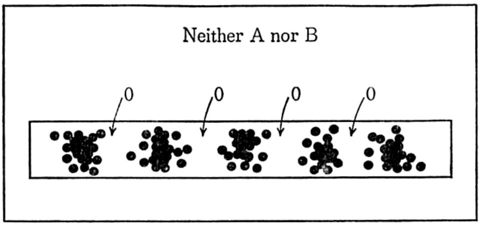


図10　カード"Neither A nor B"上の点の集り.

姿を現した時と同様に、A、Bいずれか一方を通ったと考えざるを得ない』という主張は積極的に破られたことになる。なぜというに、そう主張するなら、なぜに“Neither A nor B”の時の点の群り方が“Either A or B”の時のそれと異なって不思議な縞模様を呈すか、が全く説明されないことになるからである」

こういって一息いれた弁護人の間をついて判事長が発言しました。

判「弁護人のいわれんとすることは、その限りにおいてよくわかった。いかにも今の検証によれば、被告が姿を現さないで窓を通った時の行動は、姿を現して窓を通った時の行動と異なるものと考えねばなるまい。しかし、なぜ、“Neither A nor B”の場合に、二つの窓を一緒に通ったというような奇妙な考え方をせねばならぬのであるか。“Neither A nor B”の場合にも、やはり窓A、Bのいずれか一方を通って室内に侵入した、しかしその後において被告が異なる行動をした、と判定していかなる不都合が起るのであろうか」

弁「しばらくお待ち願いたい。その点についての説明はこれから出てくるのであるから、おわかりにならぬのも無理はない」

と、弁護人は判事長をおさえるような手振りをしましたので、判事長も苦笑しました。

弁「ただ今の判事長の疑問はまことにもっともであると思う。この疑問を解決するにはさらに次のような検証を行なう必要があるが、それを実地に行なうことは後のことにして、本弁護人はその検

証の方法と、その結果とをここで述べておこう。
その検証は上の"Neither A nor B"の検証においてどちらか一方の窓をふさいでおくのである。この時、うしろ壁の所で被告のやって来る位置を記録してみると、Aをふさいだ時についても、Bをふさいだ時についても、図9に似た均一な点の分布が得られて、決して縞模様などは現れないことがわかるであろう。すなわちこの時被告はうしろ壁のどこへでもやって来るのである。これだけのことを確かめておいてわれわれは考えてみよう。まず検察官の主張するように、"Neither A nor B"の場合に、『被告は姿を現さなかったが姿を示した時と同様にやはり二つの窓の一方、しかしてただ一方だけを通ったのだ』と仮定してみよう。この仮定をなすならば、被告がAを通った時には決してBを通らないし、またBを通った時には決してAを通っていないはずである。そうすると、Aを通った時にはBの窓がふさがっていたとしても被告には何の影響もないし、またBを通った時にはAの窓がふさがっていたとしても、被告には何の影響もないはずである。したがって二つの窓がある場合でも、被告の行動はAをふさいだ時のそれか、あるいはBをふさいだ時のそれか、のいずれかになっているはずである。ところで窓の一方がふさがっている時には、被告はうしろ壁のどこへでもやって来られることが確かめられている。そうすればなぜ二つの窓がある時、0という位置に被告は来られないのであろうか。なぜ二つの窓に特有な縞模様などが現れるのであろうか」
これだけ長広舌を振った後、弁護人は最後の結論を述べました。

弁　「以上のような、あるいはその他のいろいろな検証によって、本弁護人は多くの同僚とともに姿が見えない時の被告の行動についていろいろと考えをめぐらせたのである。本弁護人も初めのうちは、上に行なったような仮定、すなわち『姿を現さない時でも一方の窓しか通らない』という仮定をすてないでも、どうにかして二つの窓の存在する場合に被告の示す特徴的な縞模様を理解することが出来ないかと、いろいろ試みたのである。しかし、こういう試みはすべて失敗であった。この二つの窓の問題だけであったならば、上の仮定をすてないで被告の行動を理解することもあながち不可能ではなかった。しかしそんな手近な解決法では、被告がもっと複雑な状況のもとで示すいろいろの不思議な行動を説明することは出来なかった。こうして最後に到達した結論は、上の仮定は捨てられねばならぬ、ということであった。すなわち、被告は姿を現さない時には二つの窓の二つとも一緒に通りぬけていくと考えねばならぬということであった」

弁護人のこの言葉を満場は水をうったような静けさの中に聞き入りました。その空気の中にさらに弁護人の言葉は続きます。

弁　「被告が不可分の一個体でありながら、姿を現さない時には、二つの窓を一緒に通り抜けて行くというような奇妙なものであるとしたら、その姿を現さない時の行動を記述するのには、どんな方法をもってしたらいいであろうか。通常の物体の行動は、その径路を示す三つの関数 $x(t), y(t), z(t)$ によって記述することが出来た。しかし被告についてはこういうものを考えることは許されない。な

ぜなら、こういう関数は一すじの径路なるものが、常に（姿を現さない時にも）存在することを予想しているからである。被告はそもそも径路なる属性をもたない何物かであったのである。

それではこういう奇妙なものの行動を記述するのに、何をもってすればよいのであろうか。径路を示す $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ の代りに何を用いるべきであろうか。それに対する答をここでお話するにはあまりに時間を要するので、本弁護人はここに一冊の書物を用意して来た。これは被告の行動について長い間本弁護人が多くの同僚とともに考えた結果をまとめあげたものである。ただここで一言だけ要点を述べてみると、こういうものは、その状態が一つの無限次元複素空間内の原点から射出する一本のベクトルで示されるようなものであったのである。しかして被告の行動はこのベクトル――それを $\Psi(t)$ と書こう――が時間とともにどう変化するかという形で記述されるのである。それはちょうど通常の物体の行動は、その位置が時間とともにどう変るかということで記述されるのと同様である。このように被告は径路という属性をもたない奇妙なものであるが、このような奇妙なものが存在しているということをわれわれは今まで全く考えたこともなかった。その結果、あわれむべき被告は多くの誤解をこうむった。ある時は彼は全く法則を無視する不逞のやからだと思われ、またある時ははなはだしく矛盾したことをいいはる狂人と思われ、またある時は実体のない幽霊にすぎないと考えられたりした。しかし、それらは被告が通常の物体と全く別のものであることを知らないで、彼の行動を律しようとしたからである。

もし被告がこういう特殊なものであるならば、彼が姿を現した時には、いつも不可分の、したがって二つの場所になどは決していることのないようなものでありながら、姿を現さない時には、二つの窓を同時に通りぬけるというような、第三の可能性もあり得ないものではない、ということがよく理解される。ベクトルΨを用いるわれわれの記述法によると、それはすなわち次のような次第になる。被告が窓Aのところで姿を現しているところの状態をベクトルΨ_Aとし、窓Bのところで姿を現しているところの状態をベクトルΨ_Bとしよう。この時、われわれのまとめ上げた考え方によれば、二つの可能性にそれぞれ対応するところの二つのベクトルΨ_AとΨ_Bとは、互いに直角な、したがって互いに異なる次元の方向に向いているのである。ところで、例えば、被告が$\Psi=\Psi_A+\Psi_B$で表現されるような状態にあったとする。このΨは明らかにΨ_AにもΨ_Bにも等しくない。したがって、この状態において、被告は窓Aのところにあるのでもなく、また窓Bのところにあるのでもなく、結局第三のある状態にいるのである。これがすなわち第三の可能性を意味する。しかしてこの時、これは第三の状態であるといっても、窓Aのところにいる状態および窓Bのところにいる状態と全然何らの関連もないところの、すなわち例えばどこかCという他の場所にいる状態と考えるわけにもいかない。それは、ちょうど通常の空間において、X方向のベクトルとY方向のベクトルとの和はX方向ともY方向とも別の方向を向いているが、だからといって、X、Yの方向と全然独立したZ方向を向いているといえないのと同じである。$\Psi=\Psi_A+\Psi_B$なる状態においては、Aにいるのでもなく、Bにいるのでもないが、

A、Bの二つの場所に何らか関連のある一種特別のおり方をしているのである。実際に、$\Psi=\Psi_A+\Psi_B$ というような状態に被告がいる時に、しばらく時間のたった後、彼を壁のところで捕えるような『実験』をやってみると、そのおり場所について図10で示されるような特徴的な縞模様が現れることが説明される。これに対して、Ψ が Ψ_A それ自身、または Ψ_B それ自身である時に、同じ『実験』を行なうと、それは図9のような結果を与えることも証明される。こうして、$\Psi=\Psi_A+\Psi_B$ なる状態は、単に式の上からのみならずその実験的な帰結においても、密接に二つの窓と関連がある。この事実をわれわれは『この状態において被告が二つとも通りぬける』という言葉で表現したのである」

弁護人はこういい終って、一冊の書物を判事長にさし出しました。そして次のような言葉をつけ加えて、彼の長い弁論を終りました。

弁「どうか判事長、検察官はじめ満場の諸君はこの書物を熟読して下さい。そうして被告の不思議な行動について十分なご理解を得られんことをお願いします。そうすれば、あわれな被告に関するあらゆる誤解が解けることと信じます。——これで本弁護人の弁論は終りでありますが、最後にちょっと一言つけ加えさせて下さい。この書物は、私がイギリス人でありますので英語をもって綴られてありますが、幸いここにこの書物の日本語訳がある。したがって日本人諸氏はこの訳によられるのもよいと思う。この訳書は仁科、朝永、玉木、小林四氏によるものであって、非常に名訳であるというわさである」

私は自分の名前が思わぬところで飛び出してきたのですっかり面くらっていると、弁護人はいたずらっぽい例の青い目玉をくりくりさせながら、私の方をむいてにやりとしながらその本をさし出しました。おや、この顔はどこかで見たことがあるぞと思ったとたん私は思い出しました。それこそ、十数年前にわが国に来たことのあるイギリスの偉大な量子物理学者ディラックではありませんか。彼はその本を私の顔の前にさし出して、私の顔にそれをおしつけました。私は思わずアッと声を出したとたんに目がさめました。

気がついてみると、私はディラックの量子力学の一〇頁のあたりを読みながら本に顔をおしつけてうたたねをしていたのでした。灰皿においてあった吸いさしのタバコはすっかり灰になり、黄色い西日のかげは部屋のむこうの端までのびています。ずいぶんと長い、ややこしい夢からさめた私は、不思議の国の夢からさめたアリスのように、しばらくそのまま呆然としていました。そして見るともなくひろげてある本の頁をみますと、そこには次のような文句が書いてありました。

——その一つの光子は、入射光線から分たれた二つの成分のどちらへも、部分的に入って行く、というふうに描述しなければならぬ。

（昭和二十四年六月）

（『基礎科学』第一一、一二号、一九四九年、『量子力学的世界像』収録）

原子核の理論

一　原子構造と原子核

現代物理学の最も中心的な問題の一つは、物質がどんな構造のものかを究めることにある。われわれは、見たところ一様に連続的にみえる物質も、実は微細な原子から出来上っていると考えている。こういう考えは、何も新しいものではなくて、遠い昔の人々、例えばギリシャの哲学者たちも考えていたことであったが、この考えは現代の物理学の中にも生きている。しかし、われわれの物質観は、この古い考えそのままではない。いや現に、今世紀の物理学者の考えは、前世紀の物理学者の考えとくらべても全く異なっているとさえ言える。

十九世紀の物理学者の考えていた原子は次のようなものであった。それは大体において

$$R = 0.0000002\ \mathrm{cm}$$

程度の半径の球形のものである。

原子にはいろいろな種類のものがあるが、それらは全く不変のものであり、かつ、それ以上分割の出来ない究極的なものである、とされていた。

ところが今世紀に入って、物理学者は、この原子が決して不可分のものでなく、それ自身、他のより小さい粒子から構成されていることを知った。すなわち原子には、その中心に正の電気をもった一個の核があり、そのまわりを負の電気をもった電子がとりまいているという。核は大きなものでも、

$$r = 0.0000000000009\ \mathrm{cm}$$

のような小さな半径の球である。原子の半径Rとこの原子核の半径rとをくらべると、rはRの一万分の一にすぎない。

電子が大きさをもっているか否かはまだ明らかにされていないが、大きさをもっているにしても、このものは上のrの十分の一程度より大きな半径はもち得ないと考えられている。そして一つの原子の中の原子核は一個であり、そのまわりに多くても百に足らない電子が含まれている。この点から、原子ははなはだしくすき間の多い構造のものであることがわかる。これらの原子や原子核や電子がどんなに小さなものであるかは次のようにすれば直観的に理解される。いま半径一センチメートルの玉を地球大に拡大したとしよう。そうしても原子はやっとボールくらいの大きさにすぎない。そのとき原子核は針の尖端ほどの点である。この小さい世界で、電子と原子核とはその間に働く電気的な引力

によって、ちょうど太陽系をほうふつとさせるような美しい体系を作っている。原子はまさに小さな宇宙である。

二　原子核の構成成分、陽子と中性子

原子核はこんなに小さな粒子であるが、それはまた複雑な構造をもっている。原子核にはいろいろな重さのものがあるが、その重さは大体において、最も軽い原子、すなわち水素原子の原子核の重さの整数倍になっていることが知られている。通常この整数はその原子核の原子と名づけ、一般にAと書く。さらに原子核は正の電気をもっているが、その電気量はまた水素核の電気量の整数倍になっている。この整数はその核の番号と名づけられ、Zをもって一般にあらわす。例えば、ヘリウム原子の原子核は、重さにおいては水素原子核の四倍、電気量においては二倍である。したがってヘリウム核のAは4、Zは2である。また酸素の原子核は重さにおいて十六倍、電気量において八倍であるからそのAは16、そのZは8となる。これらの整数性は、原子核がさらに基本的な何らかの粒子から作られていることを暗示するように見える。

この考えは実際に原子の放射能からも裏書きされるようである。すなわち、ラジウムのような原子の原子核はヘリウムの原子核を放出してラドンの原子核に変化することが知られている。このように、他の粒子を放出して自然に他の原子核に変化するという性質をもった原子核は天然にいくつか存在す

る。トリウム、ウラニウムなどの原子核がその例である。しかし、今世紀になって実験が進歩してくると、人工的に原子核をぶちこわすことが出来るようになった。

それは高い電圧を作り出す技術の進歩のおかげである。高い電圧で強い電場を作ることが出来ると、この中に何かの原子核（よく用いられるのは、水素原子核やヘリウム原子核である）をおくと、原子核は電気をもっているから、それが電気力の作用で走り出す。このときこの電場が非常に強ければ、この原子核は猛烈な速度を得る。こうして得られた高速度の原子核を物質にぶちこむと、それが物質原子の原子核に衝突して、これに大きな衝撃を与える。こういう方法で原子核に衝撃を与えると、多くの原子核は、ヘリウム核や水素核を放出する。あるいは時にはγ線という極めて短波長の電磁波を射出したり、電子を射出したりすることもある。ところが一九三二年、イギリスのチャドウィックは、ある種の原子核においては、全く今までに知られなかった新しい種類の粒子が放出されることを見出した。この粒子は水素の原子核とほぼ同じ重さをもっているが、電気をもたぬ中性のものである。

この中性粒子が水素原子核とほぼ同じ重さをもっているということと、それが電気的に中性であるという事実は、すべての原子核を作っているものは、水素原子核とこの新粒子とであるという考えに導くことになる。例えば、ヘリウム原子核は、二個の水素原子核と二個の中性粒子とから出来ていると考えられる。すなわちそう考えれば、ヘリウム核が水素核の四倍の重さをもち、二倍の電気をもつことがただちに導かれるからである。この考えによれば、酸素原子核は水素原子核八個と、中性粒子

八個から出来ているということになる。

こうして、**水素原子核**と、この新しい中性粒子が、原子核を構成する基本的な粒子と考えられることになる。そこでこの二つの粒子には特に名をつけておくことが便利である。物理学者は水素原子核には**陽子**（プロトン）なる名を、中性粒子には**中性子**（ニュートロン）なる名を与えた。

前に原子核を衝撃するとき、電子が放出されることがあると述べた。このことから、原子核の構成要素として陽子や中性子以外に電子がなくてはならぬのではないかという考えが起る。しかし、電子が核内に存在すると考えることは後にも述べるように種々の困難な点があるので、この電子は、それが射出されるときに創生されるものであって、初めから核内にあったものではない、と考えられるようになった。こうして現在では、原子核は陽子と中性子とから作られていると考えられている。原子核のうち、水素原子核は一個の陽子そのものであるという点で最も簡単な構造であるが（それはそもそも構造などもっていないともいえよう）、ヘリウム原子核は二個の陽子と二個の中性子という四個の粒子から出来ているやや複雑なものである。この核は天然のラジウムから射出されるものとして早くから人目を引いたので、特にα粒子と名づけられている。さらにいわゆる重水素の発見から、天然界には、陽子一個と中性子一個とから出来たという非常に簡単な原子核も存在することがわかった。この最も簡単な原子核は、陽子や中性子がどんな法則によって互いに引きつけ合って核を作るかを知るのに、非常に有力な手がかりを与えるものである。

三　陽子と中性子との間の力——核力

太陽系において太陽と惑星とを結合している力は万有引力であり、これと似た構造をもっている原子において原子核と電子と結ぶものは電気的の引力である。これらの力はいずれも二つの粒子の間の距離の二乗に逆比例する強さで働く。さてそれでは原子核内で陽子や中性子を結びつけている力の場合はどうであろうか。中性子は電気をもっていないからこれは電気力ではあり得ないし、万有引力などと考えても、それはこの場合小さすぎて問題にならない。とにかく重水素の核は陽子と中性子とが結合して出来ているものであるから、この二つの間には引力が働かねばならない。

さてこの引力の「強さ」はこの重水素核の結合の強さ、詳しくいうと、重水素核を陽子と中性子とに引きはなすとき必要なエネルギーと関係しているはずである。この重水素の結合のエネルギーは種々の方法で実験的に知ることが出来るから、その値から理論的にこの引力の強さを結論することが出来る。

ところでこの引力は距離の二乗に逆比例すると仮定しては工合が悪いのである。このことをしらべるには、陽子に中性子の流れをあてて、陽子がどういうふうにはねとばされるかをしらべる実験を行なえばよい。陽子がどういう方向にどれだけはねとばされるかということは、この二つの粒子の間に働く力が距離の二乗に逆比例するか否かで異なるはずである。力が逆二乗の法則に従うならば、この

実験結果はラザフォードの公式という式で表されるはずであるが、実際の結果はそうでない。だから陽子と中性子の間の力は逆二乗の法則に従っていない。また中性子が物質中をよく通りぬけるという点からみても同様の結論を下すことが出来る。なぜなら、重水素の結合エネルギーから結論される力は大変に強くなければならぬので、もしそれが逆二乗の法則に従うようなら、二つの陽子の間に働く電気力よりもはるかに強い力が中性子と陽子の間になければならぬことになって、中性子は陽子よりも物質の中でその進路を強く影響されることになり、したがって、中性子は陽子よりも物質を通過する能力が悪くなければならぬ。これは、実際と合わない。陽子と中性子との間にそんなに強い力が働いていながら、中性子がよく物質を通りぬけるのは、その間に働く力が、二つの粒子が非常に近づいた時にかぎり働くと考えねば説明がつかない。さきに述べた中性子を陽子にあてる実験からも同様の結論が下されるのであって、それらの実験から、この力は二つの粒子が〇・〇〇〇〇〇〇〇〇〇〇〇〇二センチメートルの程度の距離まで近づいて初めて働くという結論が得られる。そしてその力の強さは約三〇〇キログラムである。

これと同様な力はまた陽子と陽子との間にも働く。これは陽子に陽子の流れをあてて、はねとばされる陽子の模様をしらべれば明らかになる。あてる陽子のエネルギーが小さいときには、この陽子は電気的の斥力のために相手の陽子に充分近づき得ない。したがって二つの陽子の間には、ただ電気力が作用するのみで、実験結果はラザフォードの公式で表される。しかし、もしあてる陽子のエネルギ

ーが充分に大きくて、これが電気的の斥力に打ち勝って相手の陽子に充分近づくようになると、電気力の上にこの新しい力が働き始めるので、実験結果はラザフォードの公式と異なってくるはずである。この違いの現れはじめるエネルギーからこの力の働き始める距離がわかり、その違いの大きさからこの力の強さが判明する。

二つの中性子の間にも同様な力が働くであろうことは直接的な実験的証明はないけれども、間接的には充分根拠を有する。これらの力を**核力**と名づける。

四　原子核の構造

核力が粒子の間の距離とどう関係するかはまだ実験的に明らかにされていないが、核力の大体の大きさと、その到達距離が明らかになったのであるから、原子核の構造は量子力学によって精密に理論的に研究し得るはずである。実際軽い原子核、すなわち重水素、ヘリウムなどの原子核の構造はそういう方法で相当明らかにされ、かつ種々の実験結果と理論とはよく一致している。

しかし重い原子核の構造ははなはだ複雑であって、その定量的な理論的研究は数学的に困難である。原子の構造は小さな太陽系になぞらえ得る、単純な美しいものであったが、原子核の構造はそれと全く類似性がないといってよい。

原子核と原子との構造上の著しい差異は原子核の稠密なことである。原子は原子に対してはほとん

ど絶対的の不可入性をもっているが、その構成成分の電子や、あるいは原子核、例えばヘリウム原子核、陽子などはちょうど惑星の間を通っていく彗星のようによく原子内を貫通することが出来る。原子はいわば隙間の多い構造をもっているのである。これに反し、例えば原子核に中性子を衝突させる実験から推定されるように、原子核にあたった中性子はほとんどいつでも原子核内に一度は捕獲されてしまう。それゆえ、原子核は原子のような隙間だらけの構造ではない。

また原子核が原子と異なるもう一つの点は、原子の大きさがすべての原子を通じてほぼ一定であるに反し、原子核の大きさはその重さに比例することである。

こういう点からみて、原子核は結局陽子や中性子が、近づいた時にだけ働く「核力」で引き合って、大きさが重さに比例するような稠密な集りを作ったものであると考え得る。個々の陽子や中性子の運動は極めて複雑不規則で理論的に追求することは出来ない。しかしかような集りの性質はわれわれが日常目睹する液体の一滴に類推をとって考察することが出来る。なぜなら、上の文章は「原子核」という語を「液体の滴」と入れかえ、「陽子」、「中性子」の語を「分子」と訂正し、「核力」を「分子力」とすればそのまま妥当するからである。もう少し精密にいうために形容詞を用いるならば、原子核は密度の極めて大きく、粘性の強い液（あるいは液晶という方がいいかも知れない）の極めて小さな滴になぞらえることが出来る、というべきである。

液体の滴は表面張力の結果、球形となる。この点は原子核も同様である。ただ核液は通常の液体と

異なって電気をもっている。したがって核液の場合には凝集力と表面張力の他に液体の各部分をなるたけ遠ざけようとする電気的の斥力が働く。番号Zの小さい原子核はその電気量が少ないからこの電気力も大した役目をしないが、Zの大きな原子核ではこの電気力が表面張力に打ち勝って、その結果その滴は二つに分裂する。理論的な計算によると、この効果のために、大体Z＝100以上の原子核は存在し得ないことになる。Zがもう少し小さくて、この電気力がそれほどはなはだしくない場合には、そういう滴は存在し得るとしても極めて不安定で、その滴が何かの原因で球形から少し変形すると、たちまち分裂が起る。これは後に述べる原子核のフィションという現象と関係がある。

五　核液の温度、核反応の機構

例えば、粘い液体に弾丸を打ち込むと、その弾丸は液体中に捕えられて液体は熱せられる。その弾丸のエネルギーが液体中の各分子に分配せられ、その熱運動のエネルギーに変化したのである。

これと全く同様に、原子核に例えば中性子を衝突させると、中性子はその核に捕えられ、そのもっていたエネルギーは原子核内の多くの陽子や中性子に分配されて、それらの複雑な運動を盛んにする。これは核液の温度が上ったことを意味する。

熱せられた液体中の分子は互いに鉢合せをしながら、そしてそのたびごとにエネルギーのやり取りをしながら複雑不規則な運動をしているが、そのやり取りの間に、ひょっとした拍子で一つの分子に

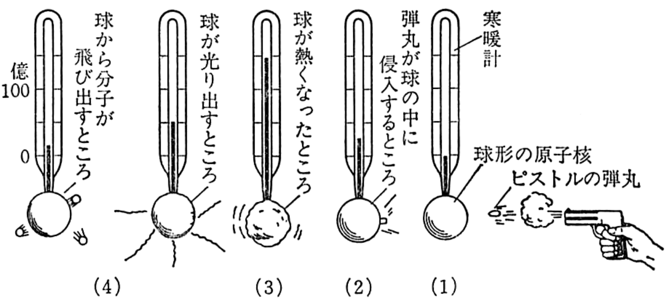


図1　(1) 核液の滴に弾丸を打ち込む，(2) 弾丸が核液に入ると滴の温度が上りはじめる，(3) 熱い複合核が出来る，(4) 複合核は蒸発して陽子や中性子を放出したり光を放ったりして冷却する．

たくさんのエネルギーが集まってしまうことがある。一つの分子が充分多くのエネルギーを得ると、これは液体の表面で働く凝集力に打ち勝って外へ飛び出すことが出来る。これがすなわち液体の蒸発である。熱せられた原子核内でも同様な機構が起っていて、その結果蒸発が起り、その表面から中性子や陽子が放出される。この場合一つの中性子または陽子にエネルギーが集まるかわりに、二つの中性子と二つの陽子（これだけの結び合せが核液の中で近より合って群を作る傾向がある）にうまく集まると、核液の表面からはα粒子が放出される。

また熱せられた液体が熱線や、温度が高ければ光線を放つように、熱せられた原子核はγ線を放つこともある。通常の液体が蒸発や輻射によって熱を失って冷却するように、原子核もこれらのものを放出するとともに冷却してしまう。

原子核を人工的に変換させるいわゆる核反応は多くこの機構によって行われる。一例として原子核に中性子を衝突させた場合をとると、その中性子はまず原子核に捕えられて熱い複合核

を作る。この複合核は熱いから蒸発を起して、あるときは中性子を放ち、あるときは陽子あるいはα粒子線を放ち、あるいはまたγ線を輻射する。多くの場合は、ただ一個の粒子を蒸発すると核は冷却してしまうが、初めに衝突した中性子のエネルギーが非常に大きいときには、核はただちには冷却しないで、引きつづいて数個の粒子を放出することもある（図1）。

かように、原子核の構造が非常に複雑であるという事情によって、原子核に温度とか比熱とかエントロピーなどという熱力学的な概念、あるいは蒸発とか熱伝導とか粘性とかの分子運動論的な概念を適用して、理論的な考察を行なうことが出来る。ただ核液の滴は通常の滴と比べると、その分子の個数が比較にならぬほど少ないことを忘れてはならない。通常の液滴中の分子数は大体二十三桁の数字で表されるのに比して、核液の一滴中の中性子、陽子の数はたかだか三桁の数字でしかない。こういう理由から、核液の一滴は熱力学の第二法則の支配する通常の液滴と異なった趣を呈する。この法則によれば、熱のエネルギーは自然に機械的エネルギーに変化することはない。しかしこの法則は物質が非常に多くの分子を含むことから結果するのであって、少ししか分子を含まない核液の一滴のような場合にはこういうことも時には起り得る。すなわち熱せられた核液の滴においては、その熱のエネルギーが時々機械的エネルギーに変化して、核の形を球形から歪ませることが起る。このとき、その原子核のZが大きい場合には、前節の終りに述べた原因によって核液の滴は分裂を起すのである。

これがいわゆるフィションと名づけられる現象であって、実際、ウラニウムに中性子を衝突させる

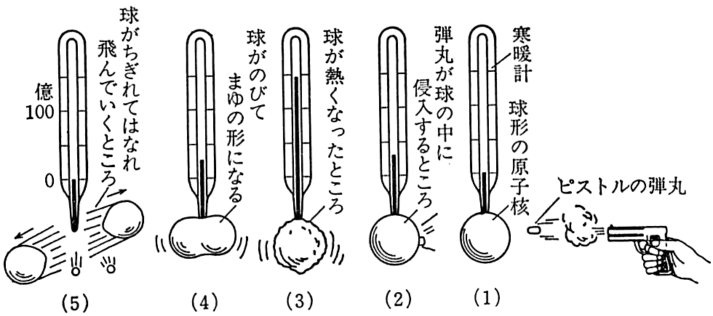


図2　(1) 大きな核液の滴に弾丸を打ち込む，(2) 弾丸が核液に入ると滴の温度が上りはじめる，(3) 熱い複合核が出来る，(4) 複合核の形が歪む，(5) 複合核は二つにちぎれて飛びはなれる．

とウラニウム核はしばしば二つに分裂することが知られている（図2）。

原子核に中性子の代りに陽子やα粒子やまたは重水素核を衝突させて核反応を起すことも可能であるが、これらの粒子は電気をもっているので、充分のエネルギーをもっていないときには、原子核からの電気的斥力のために原子核に近よることが出来ない。したがって核を攻撃する弾丸としては中性子ほど有力ではない。原子核は、これらの帯電粒子に対して電気的な土手を築いて己を護っている。中性子に対してこの土手は無力である。核液を熱するのにはまたγ線を用いてもよいが、これは液体を熱するのに輻射熱を用いることに相当する。この場合にも土手は無力であるけれども原子核は輻射に対して黒体でないので、これは能率の悪い方法である。

節の終りに、核液は一体どれくらいの熱さになるかを言ってみると、まず通常の原子核の温度は零度とみてよいが、これに普通、実験室で得られる程度のエネルギーの中性子一個を打ち

込むと百億度程度の熱さとなるのである。

六　トンネル効果と共鳴

これまでに書いてきたことは、問題にあずかる粒子に古典力学を用いてよい場合は正しいが、そうでないときには量子力学の考えを入れて、もう少し精密にする必要がある。量子力学によると粒子というものは波動性をもっている。この波の波長は粒子の運動量に逆比例していて、この波長が考えようとする問題の規模に比べて小さい場合には、近似的に古典力学が成立するということになっている。核物理学で取扱う陽子や中性子の波長は、〇・〇〇〇〇〇〇〇〇〇〇〇〇一センチメートルの程度より大きい。だからその波長は大体原子核の大きさと同じくらいか、おそい速力の粒子ではそれより大きい。したがって粒子の波動性が重要な役目をする。

原子核のまわりには土手があるので、陽子やα粒子は充分エネルギーがない以上、これにはねかえされて向う側へいけないはずである（図3、上）。

ところが波動力学を用いて、この陽子やα粒子を波動と考えると、波長が土手の厚さぐらいか、またより大きいならば、この波は幾分土手の向う側に漏れていく（図3、下）。これはちょうど光を反射するはずの金属も、金箔のようにうすくなって、その厚さが光の波長程度になると光の波を幾分通すので、金箔を通して向う側が見えるのと同じである。だから土手の上を越えるだけ充分なエネルギ

ーをもたない陽子やγ線も幾分は核反応を起すことが出来る。また熱い複合核から蒸発する陽子やα粒子は、土手を内側から越えるのに充分なエネルギーをもっていないときでも、幾分かは土手を通りぬけて外に漏れ出る。これらの現象をトンネル効果と名づける。

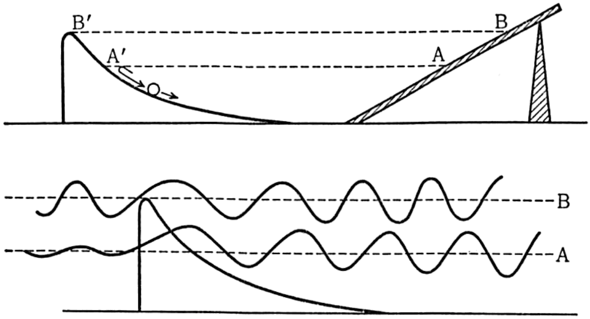


図 3 （上図）斜面のAから転がした球はエネルギーが不充分なので，土手のA′のところまで行ってもどってしまう．土手を越えて向う側へ行くにはBより高いところから転がさねばならぬ．（下図）Aから転がした球に対応する波動は土手の裏側に振幅の小さい波として漏れて出る．Bから転がした球に対応する波動は土手の裏側によりたくさん漏れる．

次に大切な波動的な現象は核反応のとき起る共鳴である。核に外部から衝突した中性子や陽子やあるいはα粒子などは核に捕えられて複合核を作る。この場合、量子力学に従うと複合核はあらゆるエネルギーを連続的にとることは出来なくて、いわゆるエネルギー準位と称せられるとびとびの値のエネルギーだけをとることが出来る。このおのおのの準位にある核は波動力学によると振動体の固有振動と似た振動的な性質をもっていて、おのおのの準位はそれぞれ特有な振動数をもっている。

さて原子核の外部から中性子や何かの波がやってきたときに、その波の振動数がこの複合核の振動数と一致したときには、ちょうどラジオの機械が外からくる電波に同調されているとき、これに共鳴して特別に強く電波を

吸収するように、この中性子は特別によく原子核に捕えられる。こういう原因で、一定の原子核に外からいろいろのエネルギーのものをあてるときに、ある特別のエネルギーのものが特によく核反応を起したり、または、一定のエネルギーの中性子やα粒子をいろいろな原子核にあててみると、そのうちの特別なものが特に強く反応したりする。おそい中性子がカドミウムに特によく吸収されるのは、中性子＋カドミウムなる複合核が波長〇・〇〇〇〇〇二センチメートルの中性子波に同調していることを示している。また例えば銀の場合には、複合核は波長〇・〇〇〇〇〇〇一六センチメートルに同調しているので、もっと速い中性子とよく反応を起す。これらの様子はラジオの機械が、いろいろまじり合った電波のうちから、特定の波長のものを選び出すのと原理の上では同じである。

七　β放射能と核力の場——中間子

自然に存在するものでも、核反応によって人工的に製造したものでもよいが、放射性の原子核の中には、電子あるいは電子の兄弟分の陽電子を放出して他の原子核に変化していくものがある。これをβ放射能と名づける。前にいったように、電子（あるいは陽電子、以下同様）は初めから核内に存在していたとは考えにくい。

その理由はいろいろといわれているが、電子のような軽い粒子が原子核のような狭い場所内に閉じ込められているためには、非常に大きな結合のエネルギーを必要とし、したがって非常に強い引力を

必要とする。しかるに電子と原子核とは反応することがほとんど稀であるので、そんな大きな力が電子と原子核との間に働くとは考えられないという一つの理由をあげることも出来よう。

だから電子は核内に初めからあったものが放出されたのではなくて、新たに発生したものと考えねばならぬ。これはちょうど原子が光を放ったり、原子核がγ線を発したりするのは、そういうものが原子や原子核の中にあったのではないのと同様である。この類推は量子力学に従って電子を波動と考え、あるいはまた光やγ線を光量子と考えれば全く平行的に行なわれる。原子や原子核の状態が変るときにエーテル（電磁場）に波が起って、すなわち光量子が放出されると同様に、核の状態が変るときに「電子波の場」に波が起って、すなわち電子が放出されるのである。

量子力学によると粒子には波動性があるという。あるいは粒子の運動現象はそれぞれの粒子の種類に応じた「場」に起る波動現象として考えられ、またその逆も考えることが出来る。

さて太陽系において働く力は万有引力であり、原子内で働く力は電気力である。これらの力はそれぞれ万有引力の場、電磁場を通じて働くものである。

相対性原理によると、遠くはなれた物体が直達的に力を働かすことはあり得ないのであって、いつでも一つの物体の存在がまずその近くの場の模様を変化し、その変化がだんだんに場の中を伝わっていって他の物体に作用する。それゆえ、核力という力も何かそれの伝わる場がなくてはならない。

原子核は、原子が電磁波を起すように、β放射のときに電子波を起すことからみて、核力の場はす

なわち「電子波の場」ではなかろうか。しかしこの考えではうまくいかない点があるので、核力の場は電子波の場と別に考えねばならぬ。この場を最初の提唱者の名を用いて「湯川の場」ということにする。場の波動現象は、粒子の運動現象と考えなおすことが出来るとすれば、この湯川の場に対応して「湯川の粒子」が存在すべきである。

核力は前に述べたように逆二乗法則に従わなくて、その到達距離は極めて小さい。だから湯川の場の性質は万有引力の場や、電磁場と少し違うところがあるべきである。

この理論をここで述べるわけにはいかないが、この場の性質の違いから湯川粒子は万有引力の粒子や光量子と違って重さがあり、かつ正負の電気を帯びているという結論に達する。一般に場を媒介として働く力の到達距離と、その場に属する粒子の重さとの間には逆比例的の関係があって、

$$\text{重さ}(g) = 0.000000000000000000000000000000000000035 \times \frac{1}{\text{到達距離}(cm)}$$

という式で互いに結びつけられる。

この式を用いると湯川粒子は電子の約二百倍あるいは陽子の約十分の一の程度の重さをもっていることになる。

この粒子が実際に発見されたのは湯川の理論が発表されてから三年後である。地上に到達する宇宙線は半分以上高速度で降ってくる湯川粒子であったのである。そして今ではこの粒子は中間子と称せ

られている。

中間子は不安定であって電子を放出して消滅する。これは実際、宇宙線の観測によって確かめ得る。そしてこれが原子核のβ放射能と密接に関係しているのである。

すなわち中間子が電子を放出するということから、中間子は電子場に波を起して消滅すると考えられるが、一方、中間子は原子核内の陽子や中性子の状態の変化に応じて、原子核内部で生滅しているものと考えられるから、結局、原子核の状態の変化に応じて電子が放出されることになる。

最後にこの節で手にとった問題、すなわちβ放射能に関する問題は、前の節までで考えた問題と異なって、宇宙線中の中間子に関する問題とともに現在の量子力学の妥当する範囲の外にあるらしいものであることを述べて終りにしよう。ちょうど原子の構造を論ずるには古典力学では不充分で量子力学が必要となったように、この問題に対しては量子力学は不充分で何か新しい理論が必要であろうと信ぜられるのである。

〔追加〕 湯川の理論をここで述べるわけにはいかないが、次のような説明もいくらかの理解に役立つかもしれない。

前に、核力は陽子と中性子とがごく近づいた時に限って働くことを述べた。この点、物質分子の間に働く分子力に似ているが、一方、核力は、原子の間に化合を引き起す化学的なヴァレンスの力に似

た性質をもっている。すなわち、核力は、その働く相手がいくつか以上になると、それ以上相手を増してももはやそれに作用しないという性質をもっているのである（ヴァレンス力にはまさにそういう性質があった。例えば炭素原子は、四個以上の水素原子と化合することはないが、それというのは、水素を四個だけ引きつけると、もうそれ以上の水素原子を近くにもってきてもそれに力が働かないからである）。このような性質の力を飽和力と名づける。

核力が飽和性をもつことは、原子核の大きさがその中の粒子の個数（したがって粒の重さ）に比例していることを説明するために必要である。核力にこの飽和性がないならば、原子核内の粒子はその個数が増加するにつれて密に集まってきて、その大きさが粒子の数に比例しなくなる。

このような飽和性を有する力は、化学力との類推から明らかなように、いわゆる交換的の力と考えるのが自然であろう。交換的な力とは、互いに作用する粒子の状態が入れ換わることによって起る力である。通常の化学におけるヴァレンスの力は、二つの原子がそのヴァレンス電子を絶えず交換し合うことによって起る。この類推に導かれて、ハイゼンベルクは陽子と中性子とは互いに変換し得るものであって、原子核中において陽子と中性子とは互いにその電気を交換して、陽子は中性子となり、中性子は陽子となり、かようなことが絶えず行なわれていることによって力が現れるものと考えた。

さて、相対性原理の要求によって、力は何らかの場の媒介によって伝達されるものだということを本文の中で述べた。例えば、二つの荷電体の間に力が働くということは、第一の荷電の存在がまずそ

の場所の電磁場を変化せしめ、その変化が光速度をもって次第に伝播し、ついに第二の荷電のある場所に到達し、かくして第二の荷電に力が働くのである。この種の考え方は古典論的な場の理論に典型的なものであるが、これを量子論的に考えるには場を量子的に考えねばならぬ。一般的な量子論の結論に従えば、量子的に考えた場に起る現象は、量子的な粒子の運動現象と全く同等であって、場に起る現象を粒子の運動現象と考えなおすことが可能である。この種の考え方によると、二つの粒子が作用することは、一方の粒子が何かその力を媒介する媒介粒子を中間的に放出し、それを他の粒子が受取ることによって行なわれるのである。例えば、電気的な力は一つの粒子が光子（光量子）を中間的に放出し、それを他の粒子が吸収することによって起り、ヴァレンスの力は一方の原子と他方の原子との間に中間的なヴァレンス電子が往復することによって起るのである。ここで「中間的に」という言葉を用いたのは、この種の放出が真の意味の放出でなく、古典的な粒子像においてならばエネルギーの不足の結果行なわれ得ないようなものであることを意味するのであって、これは、粒子が量子的なもので初めて可能となるのである。すなわち量子的な粒子のエネルギーは、不確定性原理によって、その粒子が外部に存在している時間Tと

$$E \cdot T \approx h \qquad (1)$$

の関係によって与えられるだけのゆとりをもつ結果、古典論的にはエネルギーが不足する場合でも、ある限られた時間の間だけ外部の存在が許されるのである（ここにhはプランクの定数）。

この媒介粒子の考えとハイゼンベルクの仮説とを結合すると、陽子は何か電気的の粒子を中間的に放出して、自身は電気を失い中性子に変化していることが時々あるものと考えられる。この時、その陽子の近くに他の中性子が存在しないならば、この粒子は大体(1)で与えられる時間の後には再び吸収されて、中性子に変化していた陽子はもとの陽子にもどるであろう。この時、もし近くに他の中性子が存在すれば、この媒介粒子はもとにもどらずにその中性子に吸収されることも起り得る。この時はこの中性子ともとの陽子とは、その状態を交換したことになり、ここに交換的の力が作用することになる。

さて本文でも述べたように、ハイゼンベルクの仮説につづいて、この媒介粒子は電子であるという仮説がまずフェルミによって導入された。すなわち陽子は電子を放出して中性子に変化し得るという仮説である。この場合に、電子を放出するために、古典論的に必要なだけのエネルギーが原子核内の陽子や中性子の運動状態の変化によって供給され得る場合には、この放出は中間的でなくて真の意味で起るのであって、これが原子核のβ放射能であると考えるのは極めて自然であるから、原子核にβ放射能のあることはハイゼンベルクの仮説に現れた媒介粒子が電子であることを裏書きするもののように見える。しかしこのフェルミの仮説を定量的に発展せしめてみると、β放射能と核力とを同時に説明することは不可能であることが判明した。したがって核力の媒介粒子と、β変換の時に放出される粒子とは別のものと考えねばなるまい。

いま、この核力の媒介粒子の質量がμであるものと仮定する。そうすると、この粒子が発生するためには相対律による質量エネルギーの関係によって少なくともμc^2なるエネルギーが必要である、ただしcは光速度である。原子核内の陽子や中性子の運動状態の変化によって供給し得るエネルギーは一〇〇万ボルトの程度のものであるから、もしμc^2がこれより大であれば、この種の媒介粒子が核外に真の意味で放出されることはないから、この粒子が原子核の変換の際に実験的に発見されないからといって、この仮説を反駁することは出来ない。さてその場合、(1)の関係を用いると、この粒子は

$$T \approx \frac{h}{\mu c^2} \qquad (2)$$

の時間の間だけ中間的に存在することが出来ることになるが、これだけの時間中にその粒子はせいぜい

$$l = cT \approx \frac{h}{\mu c} \qquad (3)$$

の距離だけ遠方にはなれ得るにすぎない。それゆえ、陽子が存在すると、この媒介粒子はその陽子の周囲のlなる距離の内部にだけ存在し得ることになる。この理由によって、もしμが充分大きくlが原子核の半径より小であれば、この粒子が原子核外に発見されないことは異とするに足らない。それのみならず、このことは核力の到達範囲が10^{-13} cmの程度にすぎないことを説明するのにも都合よい

ことである。すなわち陽子と中性子との間の距離がlより大ならば、陽子から放出された粒子は中性子まで到達し得ないから、この二つのものの間に媒介粒子の交換は起り得ない。したがって二つのものは何らの作用も及ぼし得ないことになる。この考えから$l = 10^{-13}$ cmとすることによって、その媒介粒子の質量を定めることが出来る。そうすると(3)の式からμとして大体電子の質量の二百倍の程度の値が得られるのである。

(昭和十六年一月)

(初出未詳、『量子力学的世界像』収録)

原子論から素粒子論へ

一　原子核

その源をさぐるとギリシャの黄金時代にまでさかのぼると言われる原子論は、前世紀においてその古代哲学者たちの予想した通りの形に発展してきた。すなわち、すべての物質はいく種類かの不可分のかつ不生・不滅・不変の原子から成っており、これらの原子は互いに結びつき合ったり離れたり、また空間内で複雑に飛びまわったり振動したり回転したりする。そうしてわれわれの感覚にうったえるいろいろな物の属性はすべて原子のこの運動や結合の状態に帰着されるという。なかんずく、物が温かいとかつめたいとかいうことは、この物を構成している原子が激しく運動しているかそうでないかによるのであるし、物が色を持っているということは、この物をつくっている原子が特定の波長のエーテルの波に特によく共振をするということにほかならない。

ところが、前世紀の終りごろから、この原子それ自身けっして不可分なものでなく、さらに複雑な構造を持っていることがだんだんと明らかになってきた。今世紀に入って十年もたつと、この原子構造に関する知識は次のような具体的な形をとるにいたった。それによれば、原子にはその中心に**核**ともいうべき粒子があって、その周囲をいくつかの**電子**といわれる粒子が、ちょうど太陽をめぐる惑星のように運行している。この電子は負の電気を帯びた非常に軽い微粒子であって、その重さは

$$m = 0.00000000000000000000000000098\ \mathrm{g}$$

にすぎない。これは原子自身の重さにくらべてもよほど小さい。原子のうちで最も軽いものと考えられている水素粒子と較べてさえ、その約一八四〇分の一にすぎない。これに対して原子の中心にある核は、電子にくらべてはるかに重く、原子全体の重さはほとんど全部この核に集中していると考えてよい。実際、水素の原子核の重さは

$$M = 0.00000000000000000000000166\ \mathrm{g}$$

の程度である。

原子には九十いく種類かのものがあるが、このように原子に種々のものが存在するのは、この原子核に種々のものが存在する結果である。原子の原子量の大小は、つまりその中心にある原子核の重さの大小にほかならない。かように原子核にはいろいろなものが存在するのに対し、原子内の惑星である電子はただ一色である。

原子核を特徴づける大切な性質は、その重さのほかにその電気量である。原子核はどれをとっても必ず

$$e = 0.00000000048 \text{ 静電単位*}$$

なる電気量の整数倍の正の電気を帯びている。例えば水素の原子核はちょうどこの e だけの電気を持っているし、ヘリウムの原子核はその二倍、酸素の原子核はその八倍の電気を持っている。この整数は通常その原子の原子番号とよばれている。電子は負の電気を帯びているので、原子核の正の電気量が多ければ多いほどその周囲に多くの電子を吸いつけることができ、そうして原子は全体として電気的に中性な惑星系をつくるのである。もう少しこのところを詳しくいうと、電子はちょうど前述の符号を逆にした

$$-e = -0.00000000048 \text{ 静電単位}$$

の電気を持っているので、中性の原子はちょうどその原子番号だけの惑星電子を持っていることになる。

* 一静電単位とは、等しい電荷を持った物体を一センチメートルの距離に離しておいたときに働く力がちょうど一ダイン（一ダインというのは一グラムの重力の九八〇分の一の大きさの力である）であるときの電荷の量をいう。

原子核を特徴づける他の量、すなわちその重さは、どの原子核のをみてもだいたい水素原子の重さ、

すなわち上のMの整数倍になっている。通常の水素の原子核はちょうどこの重さを持っているし、いわゆる**重い水素**の原子核はほぼこれの二倍である。ヘリウムの核はこれの四倍、通常の酸素の核はこれの十六倍の重さを有している。この整数は通常その原子核の質量数と名づけられている。

原子核は球形をしているものと考えられ、その大きさ（体積）はだいたいその重さに比例する。もちろんこの球ははなはだ小さなものであって、ウラニウムのような最も重い原子核でもその半径は、

$$r = 0.000000000009 \text{ cm}$$

の程度である。これは原子そのものの半径の約一万分の一にすぎない。

二　核　粒　子

原子核はこんな微細な粒子であるが、これすら不可分なものではないことが明らかになった。例えばラジウムのような放射性物質の原子核は自然にヘリウムの原子核を放出してラドンの原子核に変換して行く。天然にはラジウム以外にもトリウム、ウラニウムその他多種の放射性物質が存在し、これらの物質の原子核はみな自然に分解して変換していく。この場合に、ラジウムにおけるように、ヘリウム原子核が放出される場合もあるが、それ以外に電子が放出されたり、γ線という極めて波長の短い電磁波が射出されたりする。こうして原子は結局、不変なものでもないことになった。

今世紀も三〇年代にいたると、この種の原子核の変換を人工的に広範囲の原子核にわたって行なう

ことができるようになり、いままで自然界に存在していなかった新しい種類の原子核を人工的につくることさえできるようになった。それは、非常な高速度で水素やヘリウムの原子核を走らせる技術が進んできた結果である。すなわちこの高速度粒子をいろいろな原子核にぶっつけてみると、その衝撃によってこれらの原子核は破壊され、他の種類のものに変ってしまうのである。この核の破壊が行なわれるときヘリウム原子核、電子、あるいはγ線の出ることもあるが、それ以外に水素の原子核や、まったく新しい種類の粒子「**中性子**」が現われることが稀でない。

この中性子は一九三二年にイギリスの物理学者チャドウィックの発見したものである。この粒子は電気的にまったく中性であって、その重さはほぼ水素原子核の重さMに等しい。

こういうふうに原子核が変換するときにヘリウム原子核（これをα粒子とよぶことがある）や、水素原子核（これを**陽子**と名づける）や、中性子、電子などが放出されるのであるから、原子核はこういう粒子から構成されているものと考えることができる。このうち、電子が原子核内に存在すると考えることはいろいろな点で困難な事情があるので、この粒子は核の変換のとき新たに生まれるものであって、始めから核内に存在していたのではないと考えねばならない。こうして最も簡単な考え方として、すべての原子核は中性子と陽子とから構成されているという仮説に導かれる。

この仮説によるならば、すべての原子核の質量がMの整数倍になるという事実がただちに了解される。この考えに従えば重い水素の原子核は一つの陽子と一つの中性子との結合したものであり、ヘリ

ウム核は二つの陽子と二つの中性子との結合したものであり、一般に原子番号Zで質量数Aの原子核はZ個の陽子と$(A-Z)$個の中性子から構成されているものと考えればよいことになる。また実験的には例えば重い水素の核にγ線をあてると、これが実際、陽子と中性子とに分解することが示されるので、この仮説は十分な実験的根拠をもっている。

陽子と中性子とがこうして原子核の構成要素と考えられるようになったので、この二種の粒子を併せて**核粒子**とよぶ。

三　核　力

太陽系において太陽と惑星とを結合している力は**万有引力**であり、これと似た構造を持っている原子において原子核と惑星電子とを結ぶものは**電気的の引力**である。これらの引力はいずれも二つの粒子の距離の二乗に逆比例する強さで働く。それでは、原子核内で陽子と中性子とを結びつけている力は何であろうか。中性子は電気を持っていないからこれは電気力でありえないし、万有引力はこの場合小さすぎて問題にならない。とにかく重水素の核は陽子と中性子との結合してできているものであるから、この二つの間には引力が働かねばならない。

この引力の「強さ」はこの重水素核の結合の強さ、詳しくいうと、重水素核を陽子と中性子とに引きはなすとき必要なエネルギーと関係しているはずである。この重水素の結合エネルギーは種々の方

法で実験的に知ることができるから、その値から理論的にこの引力の強さを結論することができる。

ところでこの引力は距離の二乗に逆比例しないのである。このことをしらべるには、たくさんの陽子の集まりに中性子の流れをぶちこんで、それがどういうふうに散乱されるかをしらべる実験を行なえばよい。中性子がどちらの方向にたくさん散乱され、どちらの方向には少ししか散乱されないかという、いわゆる散乱の方向分布は、この力が距離の二乗に逆比例するか否かで異なるはずである。力が逆二乗の法則に従うならば、この実験結果はラザフォードの公式という式で表わされるはずであるが、実際の結果はそうでない。だから陽子と中性子の間の力は逆二乗の法則に従っていない。

また中性子が物質中をよく通りぬけるという点からみても同様の結論を下すことができる。なぜなら、重水素の結合エネルギーから結論される力は大変強くなければならぬので、もしそれが逆二乗の法則に従うようなら、二つの陽子の間に働く電気力よりもはるかに強い力が中性子と陽子の間になければならぬことになって、中性子は陽子よりも物質の中でその進路を強くまげねばならぬことになり、したがって中性子は陽子よりも物質を通過する能力が悪くなければならぬ。これは実験と合わない。陽子と中性子との間にそんなに強い力が働いていながら、中性子はよく物質を通りぬける。それはそのとき力が、二つの粒子が非常に近づいた時にかぎり働くと考えねば説明がつかない。さきにのべた中性子を陽子にあてる実験からも同様の結論が下されるのであって、それらの実験からこの力は二つの粒子が

$$r_0 = 0.0000000000002\ \text{cm}$$

の程度まで近づいて初めて働くという結論が得られる。そしてその程度に近づいたとき働く力の大きさは約

$$F = 300\ \text{kg}$$

である。陽子にしても中性子にしても、その重さは前にのべたMのように小さなものであるから、それとくらべてこのFは驚くべき大きなものである。

これと同様な力はまた陽子と陽子との間にも働く。これは陽子の集まりに陽子の流れをあてて、その散乱の様子をしらべれば明らかになる。あてる陽子のエネルギーが小さいときには、この陽子は電気的の斥力のために相手の陽子に充分近づきえない。したがってこのとき二つの粒子間にはただ電気力が作用するのみで、したがって実験結果はラザフォードの公式で表わされる。しかし、もしあてる陽子のエネルギーが十分に大きくて、これが電気的の斥力に打ち勝って相手の陽子に十分近づくようになると、電気力の上にこの新しい力が働き始めるので、実験結果はラザフォードの公式と異なってくるはずである。

この違いの現われ始めるエネルギーから、この力の働き始める距離がわかり、この違いの大きさからこの力の強さが判明する。そうして得られた値は、さきほどのべたr_0とFとに一致する。

中性子と中性子との間にはどんな力が働くか、まだ直接それをきめる実験はない。しかし、間接的

には、いろいろな事実から、中性子どうしの間にも同様な力が働くものと考えられる。

核粒子の間に働くこの種の力を**核力**と名づける。

四　エーテル

陽子と電子の間、その他一般に帯電粒子の間には電気力が働く。また核粒子の間には核力が働くことを述べた。そこで物理学はこの力を問題にとりあげねばならない。核力の方はあとにまわして、ここで電気力について物理学者の考えるところを述べよう。

正の帯電体と負の帯電体とがあると、これらは互いに距離の二乗に逆比例する力で引張り合う。このとき一方の物が他方の物に直接作用するのであろうか、それとも何か途中の媒体を通じて作用するのであろうか。この後の方の作用の仕方を明らかにするために次の例をとってくる。

相当長い筒の両端にピストンをはめたものを考える。この筒の中には空気が入っているものとする。いま一方の端のピストンを筒の中におし込むと、他のピストンがおし出されることは明らかであるが、これはピストンどうしが直接作用するのではない。その証拠に、一方のピストンを一瞬に中におし込んでみると他のピストンはすぐには動き出さない。一方のピストンをおし込むと、その瞬間にまずその近くの空気が圧縮され、次に、その圧縮された空気がもとの状態にひろがろうとしてその隣り横の空気を圧縮する。こうして圧縮された状態がだんだん他の端に向って進んで行き、最後に他の端のピ

ストンに接した空気が圧縮されると、初めてこの空気によって他のピストンがおし出されるのである。第二のピストンに力を及ぼすのは、このピストンに接している圧縮状態の空気であって、第一のピストンそのものではない。したがってこの力はその場所の空気の圧縮の度合だけに関係するのであって、このとき遠方で何が起っているかには関係しない。この場合、第二のピストンがおし出されるのは、第一のピストンをおし込んだときよりいくらかおくれ、その間、エネルギーは途中の媒体である空気の圧縮されたところに蓄えられている。

二つの帯電体に働く電気的な作用は、真空中でも存在するのであるから、電気的な力は直接帯電体の間に働くものであると考えられるかもしれない。しかし、一方の帯電体を一瞬に動かしてみて二つの物体の距離を変えたとき、他方の帯電体に働く力がその瞬間から変った値になるのであろうか。あるいはもっと極端にいって、一方の帯電体を一瞬に消滅させたとしたら、他方の帯電体に働く力がその瞬間からなくなるであろうか。もし電気力が帯電体の間の直接の作用ならそうなるはずである。

もしそうならないで、一方の物体の変化がいくらかおくれて他方の物体に及ぶなら、この二つの帯電体の間の力は、何かその間に充ちている媒体を通じて働くと考えねばならない。このとき、一つの帯電体に力を及ぼす能力を持っているのはこの媒介物であって、遠方にある他の帯電体そのものではない。力は一つの帯電体からまずそれに接している媒体の一部に伝えられ、その媒体部分がその隣りの部分に力を伝え、こうして遠く離れた、帯電体の置かれた場所の媒体部分まで力が伝えられ、最後

にこの媒体部分がそれの接している帯電体に力を及ぼす。この考え方によれば、力の原因は空間の場所場所にある媒体が持っているのである。そうして、この空間に充満した媒体はこうした力を現わす能力のほかに、エネルギーを蓄える能力を持っている。

電磁気の理論は初めのうち前の方の考え方に基づいてつくり上げられていた。すなわち電荷や電流や磁極は互いに直接作用を及ぼすという考えである。しかし後にファラデーやマックスウェルは後の考え方によって理論をつくり上げた。この理論によると、電気力や磁気力をあらわす能力は空間に充満している媒体が持っているのであって、ある場所に帯電体をおくと、それに働く力はその場所の媒体の状態できまるというのである。したがってこのとき遠い所で何が起っていようと、それはその力に関係はない。マックスウェルの理論では、この場所場所の媒体の状態が時間的にどう変化するかという形で、電磁気の法則が表わされる。そのときこの法則は、上例の筒の中の空気の圧縮状態、あるいは粗密状態が、おのおのの場所場所でどう変化するかという空気力学的な法則と極めてよく似た形の数式で与えられることになる。この電磁気の法則を表わす数式を**マックスウェルの方程式**という。

こういうふうに空間中に充満した媒体の物理的性質が、空間の場所場所に分布していると考えたとき、その空間にはその性質の「**場**」があるという。上の例の筒の中の空間には、空気の「**粗密の場**」が存在するし、帯電体や電流の存在する空間には「**電磁場**」が存在する。

ところで筒の中の粗密場の媒体は空気であったが、それでは電磁場の媒体は何であろうかというこ

とが問題になる。電磁場は真空中でも存在するのであるから、これはガスのようなものではなくて、もっとつかまえ難い何物かである。その本体はよくわからぬながら、前世紀の物理学者はこれに**エーテル**という名を与えた。

五　光　波

空気中の粗密場の従うべき空気力学の方程式を解いてみると、空気中には、粗密状態が交互に波状に変化しながら伝わっていくという現象の起りうることがわかる。しかも、その粗密波の伝わる速さがちょうど音の速さになることが計算される。こうして、音の粗密波論ができることになる。すなわち、適当な範囲の波長の粗密波が耳に入ると音の感覚を引きおこすというのである。それとまったく同様に、電磁気の場においても、マックスウェルの方程式を解いてみると、電気力や磁気力が波状に変化しながら伝わるという現象の可能なことがわかる。しかもその波の伝わる速さを計算してみると、ちょうど実験的に定めた光の伝播速度に一致する。このことから、光というのは電磁場に起ったエーテルの波であるという理論が生まれてくる。すなわち光の感覚は、適当な範囲内の波長のエーテル波が目に入ることによって起るという考えである。波長がこの範囲内にないラジオの波や熱線の波や、あるいは紫外線やX線の波は光の感覚を生じないが、簡単のためここではこのエーテル波を総称して**光波**とよぶことにしよう。

粗密波の存在する空気の中や、表面波の存在する水の面には力学的なエネルギーが蓄えられている。それと全く同様に、光波の存在する場所にはエーテル中にエネルギーが蓄えられていると考えねばならない。この場合に場の蓄えているエネルギーはいずれも波の存在する場所に連続的にひろがっているのであって、この波の場の中に波を受けるもの（例えば音の場合には薄い膜のようなもの、光の場合には帯電体など）があると、このエネルギーはこのものに伝えられ、このものは運動を始める。もっともいちじるしい場合はいわゆる共振の場合であって、このときはエネルギーはどんどん波からその受波物に吸いとられて行く。

光がこの理論のいうような波であるということの証拠はたくさんにあるが、その最も簡単なものを一つだけかかげておこう。それは**ヤングの実験**といわれるものであって、これはちょっと器用な人なら専門家でなくても行ないうる程度の簡単な実験である。その装置は図1で示したように単色光の光源O、小さいスリットSをうがったついたて、せまい間隔をおいて二つの平行なスリットAとBとをうがったついたて、および最後に光を受けるついたてXとから成る。Xのところには場合によっては写真乾板をおいてもよい。

光源Oを出た光の波は小さなスリットSに達し、ここを洩れ出ると、そのSを中心とする円形波になる。この波が二つのスリットAとBとの所に達すると、ふ

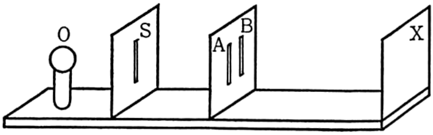


図1

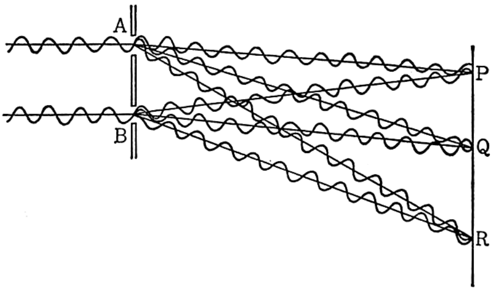


図2

たたびこの二つのスリットを洩れ、ここにA、B二点を中心とする二つの円形波ができる。この円形波はこのついたての右側の空間で互いに重なり合っていわゆる**干渉**を行なう。すなわち、二つの円形波の山と山とが重なったり、谷と谷とが重なったりするところでは波が強め合い、山と谷との重なるところでは、波は打ち消してしまう。その結果、ついたてXの上に、波の強くあたるところと、波のあたらないところとが交互に規則正しくならんで現われる。すなわち美しい明暗の縞模様が現われるのである。

この原理を図2に示しておく。図2のPという場所は、Aから来る波とBから来る波とのそれぞれ山どうし、あるいは時間によっては谷どうしが重なって来るような場所である。それゆえ、ここでは波の振幅はもとのものの二倍になる。これに対し、Qという場所は、Aから来た波が山になっているようなときにはBから来た波の谷がちょうどここに来るし、逆にAから来た波が谷になっているときにはBからの波の山がやって来るというような場所である。したがって、ここでは二つの波は常に打ち消し合って、したがってここでは波の振幅はゼロである。さらにRという場所ではふたたびPと同様な事情が起り、したがってここで波の振幅は大きい。

この実験において、明るい場所Pと暗い場所Qとの間隔は、二つのスリットAとBとの間隔と、用いた光の波長とで決定されることが幾何学的な計算でわかる。詳しくいうと、PとQとの間隔は、用いる光の波長が短いほどせまくなり、また二つのスリットAとBとの間隔が小さいほどひろくなる。極端な場合、AとBとの間隔がゼロになると、すなわちただ一つのスリットを用いる場合には、暗点Qは明点Pから無限に遠方に行ってしまう。したがってこのときには干渉の縞模様は現われない。

このような計算を量的に行なうと、PとQとの間隔を実験的に測って、光の波長を決定することができる。こうして光の波長をしらべてみると、光の色を定めるものはその波長であることがわかる。例えば赤い光とは

$$\lambda_{赤} = 0.00008\ \text{cm}$$

の波長の波であり、紫の光とは

$$\lambda_{紫} = 0.00004\ \text{cm}$$

の波長の波であることがわかる。X線のようなものになると、波長がさらに短いので、ヤングの実験でその波長をきめようと思うと、スリットA、Bの間隔を非常に小さくしなければならない。すなわちそうしないと干渉の結果として現われる明暗の縞があまりに細かくなりすぎて、それを観察することがむつかしい。しかし、X線に対しては、二重スリットの代りに結晶体が役に立つ。結晶というものは規則正しい原子の配列からできているので、これにX線の波があたると、おのおのの原子によっ

て散乱されたX線の波が、規則正しく干渉して、やはりその背後に規則正しい明暗の模様を生ずるのである。このとき結晶内での原子の間隔は十分に小さいので、この明暗の模様はX線の波長が小さいにかかわらず観察するのに十分なくらいに大きな間隔をもって現われる。

こうして、光線のみならずX線もエーテルの波であることがわかった。熱線や紫外線、あるいはγ線なども同様にエーテルの波である。

六　光子

すべての物体は不可分の原子からなり、原子はエーテルの充満した空間内で飛びまわったり、回転したり、振動したりしている。われわれの感覚に直接うったえる物の色とか、ひびきとか、温かさとか、あるいは物の硬さとか、そんなものはすべてこの原子運動の離合集散や、エーテルの波動に帰着されてしまう。こうして、色もなく、音もなく、温かさもない運動ばかりの世界が物理学的な自然界である。これが前世紀の物理学の達した自然観である。

ところが、この十九世紀的な自然像は三つの大きな発見によって破られねばならなかった。その一つはすでに述べた原子構造に関する発見であるが、他の二つは「量子」の発見と、「エーテルの運動否定」の発見である。この後の二つの発見は、いずれもこの世紀の初頭に行なわれたものである。

量子という考えを初めて物理学に導き入れたのはプランクである。しかし、ややおくれてアインシ

ュタインが同様な考えを、いや、さらに徹底した考えを主張した。ここでアインシュタインの考えを述べることにしよう。

光はエーテルの波であると前世紀の物理学は主張している。この考えはヤングの実験その他によって十分根拠のあるものである。それにもかかわらず他方多くの現象をしらべてみると、光が何か粒子の流れであると考えねば説明のつかぬ事実がたくさんに存在する。アインシュタインはこういう事実のいくつかに注目して、それから光の粒子説を主張したのである。しかしてこの仮説的な光の粒子を彼は**光量子**と名づけた。現在ではもっと簡単に「**光子**」という名がひろく用いられている。

光がつぶつぶのものの流れであるという結論の根拠になる現象のうち、最も端的なものは光電効果という現象である。この現象の話に入る前に一つ次のたとえ話をしておくのが便利である。

海岸に沿って一列に同じような家のたちならんだ町を想像しよう。この町を津浪がおそったとする。そのとき町の受ける被害の状況については次の事実が成立する（図3左）。

一、すべての家屋はおしなべて公平に同じ程度の被害を受ける。すなわち、ある家はたくさんの損害を受けたのにある家は少しも損害を受けないなどということはない。

二、おのおのの家の受ける損害は津浪の大きいほど大きい。

三、すべての家が一様に被害を受けるのだから、損害を受けた家屋の戸数は津浪の大小に無関係に一定である（それは町の全戸数である）。

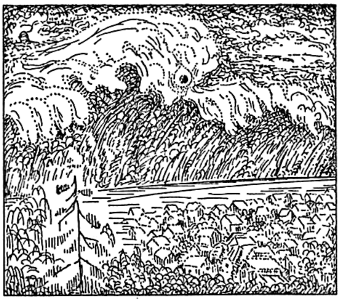




図３

次にこの同じ町が津浪でなくて沖から艦砲で射撃されたものと考える。そのとき町の受ける被害の状況については次の事柄が成立する（図３右）。

一、家屋損害の程度は弾丸のあたった家とあたらない家とで全く不公平である。弾の命中した家は大きな被害を受けているのに、命中しなかった家は完全に無事である。

二、弾丸のあたった家の損害は、弾丸の大きさが一定している以上すべて同じであり、そしてこの損害は砲撃のはげしさには関係しない。ただし、一戸の家に二発以上の砲丸があたるほどに射撃の密度は大きくないとする。

三、砲撃がはげしいときには、損害家屋の戸数が増す。

この上に、さらに次の項目をつけ加えることもできる。

四、大きな口径の大砲を用いると被害家屋の損害は大きくなる。

この二通りの出来事における損害状況の特徴をこうして、一、二、三、四とならべてみたが、それを互いにくらべてみると両者の間に特徴的な差異のあることがわかる。この差異の根本的な原因は、破

壊的エネルギーが津浪においては空間に連続的にひろがりながら町におそいかかるのに対し、砲撃においてはそのエネルギーが一つ一つの弾丸に集中して飛んでくるからである。これでたとえ話は終りにしよう。

さて**光電効果**というのは、光を金属の面にあてると、その表面から電子が飛び出してくるという現象である。これは金属原子の中に含まれていた電子が光からエネルギーをもらって外部に飛び出してくるのである。今世紀のはじめにレーナルトはこの現象をくわしくしらべて次の三つの結論を得た。

二、飛び出してくる電子の運動エネルギーを一個一個しらべてみると、用いる光として単色のものを用いるかぎりすべて同一であり、用いる光の強さには関係しない。

三、用いる光を強くすると、飛び出してくる電子の個数が増加する。

四、赤い光より紫の光を、紫の光より紫外線を、紫外線よりX線を用いた方が飛び出る電子のエネルギーはより大きくなる。

ここで番号を二から始めたのはこの結論を前のたとえ話の損害状況とくらべるためである。すなわち、この結論の二、三、四と、たとえ話の被害状況の二、三、四とをくらべると、金属内で電子の受ける「被害」は津浪による町の被害よりもむしろ砲撃によるそれに対応していることがわかる。したがって、この現象から結論されることは、光のエネルギーは弾丸の場合のように、ある大きさのかたまりとなって空間を飛んでくるのであって、決して空間に連続的にひろがってやってくるのではないとい

うことである。しかも、このとき光の色を一定にすれば、そのエネルギーは一定の大きさの弾丸の場合と同様に一定しており、かつ第四の結論から、紫の光の弾丸は赤い光の弾丸より、紫外線の弾丸は紫の光の弾丸より、X線の弾丸は紫外線の弾丸よりより大きなものであることがわかる。このとき、おのおのの色に対する弾丸の大きさは、弾丸の命中した電子の受ける「被害」の程度、すなわち飛び出してくる電子の運動エネルギーから決定することができる。こうして赤い光とは

$(h\nu)_{赤} = 0.0000000000024$ エルグ*

の弾丸からなり、紫の光とは

$(h\nu)_{紫} = 0.000000000005$ エルグ

の弾丸からなることがわかる。そして、光電効果において赤い光が電子に与えるエネルギーはいつもこの $(h\nu)_{赤}$ であるのみならず(ただし二発以上の弾丸が一つの電子に命中するほど光の密度は大きくないとして)、光のエネルギーが他のものに移されるというどんな現象においても、赤い光は決してこの $(h\nu)_{赤}$ より小さい弾丸のように振舞うことはないのである。すなわち赤い光が $\frac{1}{2}(h\nu)_{赤}$ とか $\frac{1}{8}(h\nu)_{赤}$ とかのエネルギーのかたまりのように振舞うことは決してない。このことを言いかえれば、この弾丸は不可分であって、その破片(かけら)などが観察されることは決してない、ということになる。

* エルグというエネルギーの単位は、物体に一ダインの力が働いてそれも一センチメートルだけ動かすのに必要なエネルギーのことである。言いかえると地上で九八〇分の一グラムの物を一センチメートルだけもち

上げるに要するエネルギーである。エネルギーの単位にはよくカロリーが用いられるから、一エルグがカロリーにしてどのくらいあるかを書いておく。それは

1 エルグ ＝ 0.000000024 カロリー

である。

七 電子波

アインシュタインが提出した光の粒子説はまさに物理学界に一石を投じたもので、これは物理学者をまったく困惑させてしまった。というのは、光がエーテルの波であるということは干渉の実験から考えてまったく疑うことのできないものだったからである。光が波であるということと、光が粒子であるということがどんなに互いに相いれない考えであるかは次の節でのべるが、この困惑から物理学者がぬけ出るには二十年以上の歳月が必要であった。この二十年の間にもう一つこれにおとらぬ奇妙な発見が行なわれた。それはすなわち電子に波動の性質があるということである。

電子の波動性は理論的にはド・ブロイによってまず予想され、実験的な発見は数年後ダヴィソンによってなされた。

一九二五年のある日、ベル電話会社研究所のダヴィソンの実験室に一つの椿事が起った。それは実験に用いていた液体空気のびんが爆発して、何もかもめちゃくちゃになってしまったのである。ダヴ

ィソンはこのときニッケルの板に陰極線をあてて、その線が板によってどう散乱されるかをしらべていた。彼は実験をまたやりなおすために、まず液体空気をかぶって表面がすっかり酸化してしまったニッケル板をみがき、中に吸蔵された酸素をぬき取る目的で、この板を真空中で長い間熱せねばならなかった（物資の豊かなアメリカでもだめになったものを捨ててしまうことはやらなかったと見える）。ところがこの熱処理の結果、ニッケル板はみごとな結晶に変化した。この結晶した板を用いて実験をくりかえして見ると、驚くべき結果が現われた。

それは、散乱された陰極線の強さが、その方向によって非常に規則正しい大小をくりかえすことである。ダヴィソンはただちにド・ブロイの考えを思い起した。陰極線は電子の流れであるから、もし電子の流れがド・ブロイの説のように波の性質を持っているなら、ちょうど結晶にあたって散乱されたX線の波が、干渉によって美しい縞模様を作るように、電子線も結晶によって、規則正しい強弱の縞模様を作るはずではないか。彼はこの考えに従って、さらに精密な実験を二年間つづけ、十分な自信をもって、この規則正しい強弱のくりかえしを電子線の波の干渉によるものだと結論した。

こうして、X線が波であると言われるのと同様の確かさで、電子線が波であると結論することができる。電子線の波長は、X線や光線の波長を定める実験とまったく同じ方法で決定することができる。

こうして電子線は光線と同様に波であると考えられるにいたり、光の波に対し、マックスウェルの方程式が存在していたように、電子の波に対しても電子場の方程式が決定されるようになった。この

考えによれば電子は光と全く同様にある媒質に起る場の現象である。

しかしこのとき、一方に電子が粒子であるという考えを全く捨てることはできない。事実、電子は第一節にかかげた m なる質量を持ち、$-e$ なる電気を持った不可分の粒子である。$m/2$ の質量だの $-e/3$ の電気だのを持った粒子は決して観察されたことはない。また町の艦砲射撃や光の光電効果に相当して、電子の粒子性を最も端的に示す現象としてシンチレーションという現象をあげることもできる。

ある種の螢光性物質を一面に塗った板に電子線をあてると、その面が螢光を発する。このとき、あまり密度の大きくない電子線を用いてみると、その板の螢光について次の事実が観察される。

一、螢光板は一面に光るのではなく、あちらがぽつり、こちらがぽつりというふうに光る。この現象をシンチレーションと名づける。

二、光点の明るさは、用いる電子線装置の電圧が一定しているかぎり、用いる電子線の強さ（電子線の強さとは電子線の流量のこと）に関係なく一定である。

三、電子線の強さを増すと（装置の電圧は変化させないで）光点の数と頻度とが増す。

四、電子線の電圧を増すと光点の明るさは増大する。

以上の四つは、砲撃の場合の被害状況一、二、三、四とくらべて、明らかに、電子線のエネルギーは粒子状に集中して螢光板にあたるのであって、決して波のように空間に連続的にひろがりながらやっ

てくるのではないことを示している。

こうして波と粒とのディレンマは電子の場合にも光の場合と全く同様に存在することになった。

八 波 粒

光線にしても陰極線にしても、干渉を示すという点で波と考えねばならぬのに、光電効果やシンチレーションでは粒子と考えねばならぬことになった。それではいったい本体は何なのであろう。粒子といい波といい、われわれの持っているそれらの概念は、一つのものがそのどちらでもあることができるというようなものではない。

例を電子にとってみて、陰極線を用いてヤングの実験を行なったものとする。電子が粒子であるなら、この実験でそれぞれの粒子はスリットAかBかのいずれか一方を通るはずである。一つの粒子がその両方を通るようなことはありえない。ところでAを通った粒子にとって、Bに孔があるかないかは何の影響もないはずである。いわんやBの孔がAから近いところにあろうが遠方にあろうが、その行動が影響されるはずはない。このことは、Bを通った粒子にとっても同様である。そうすれば、陰極線中のおのおのの粒子は、各自一つだけの孔があったときと全く同様な行動をするはずであり、したがって、Pの上に投ぜられる像は、一つの孔だけが存在していたときの像をABの間隔だけずらして重ねたものにすぎないはずである。こうなると、Xの上に明暗の縞など現われるはずがない。とこ

ろが事実はこのとき電子の波動が現われて縞がでてくるのである。

この実験で、ついたてXの所に写真乾板をおいて十分長い間さらしておくならば、電子線が非常に弱くて、その源Oとついたて X の間に、いつも一個の電子だけしか存在しないようにしておいても、干渉縞を写真にとることができる。したがって、この縞は一個の電子だけの行動において、すでに問題になることがわかる。このとき、写真乾板のかわりにシンチレーション用の螢光板をおくと、ぽつりぽつりとあちこちがときどき光るわけであるが、干渉縞の暗線の場所は決して光ることがない。

この実験から次の結論が出てくる。すなわち、一個の電子が二つの孔をうかがったついたての背後に出て来たとき、この電子は、干渉縞の暗線のところへは決して来ることがない。

なぜこの電子は暗線のところに来ないのであろうか、この電子は二つの孔のどちらかを通ったにちがいないが、どういう方法で孔がもう一つ存在するということを知ったのであろうか。しかもこの電子が正しい間隔をおいて暗線のところに来ないためにはどうしても、他方の孔がどれだけ隔ったところにあるかを知っていなければならないはずである。

こう考えるとどうしてもわれわれは電子がスリットA、Bを通るときには波のように両方の孔を同時に通りぬけるのだと考えねばならない。しかし、この考えが正しいなら、スリットの所でときどきは $m/2$ の質量や $-e/2$ の電気を持った電子がつかまってもよさそうなものであるのに、そんなことは決してない。事実A、Bの前に螢光板をおくと、それがA、B両方にまたがってひろく一面に光ると

か、AとBとが半分ずつの明るさで同時に光るとかいうことは決してない。Aがぽつりと光るときにはBは光らないし、またBが光るときにはAは決して光らない(電子線の密度が非常に大きいなら、AとBとが同時に二つの電子で光らされる場合もあるかもしれないが)。

こういうディレンマが現われることは光についても、全く同様である。それのみならず、この迷理は自然現象に深く根ざすものであって、あらゆる粒子と波とに共通なものであることがわかった。ただ光とか陰極線の場合にそれが特に著しく現われるのである。

この迷理の解決は今世紀の二〇年代の終りごろにやっと得られた。それについては後に立ちもどってくるが、一口にいうと、光にしろ電子にしろ、それは粒子でも波でもなかったのである。それらのものはまったくわれわれが今まで知らなかった性質の「あるもの」であって、したがって、それについての概念をわれわれが未だかつて一度も所有しなかったような「新奇なもの」である。

九　光速度

粒子と波とのディレンマが物理学者をなやませだすより前に、もう一つ前世紀の終りごろから物理学者を困惑させた事柄があった。それは光の波の媒質であるエーテルの性質に関するものである。

エーテルは光波の媒質として空間に充満しているものと考えねばならぬ。そうなると、この媒体は動いているものであろうか、止まっているものであろうかとか、あるいはわれわれはこの媒体に対し

て動いているのであろうか止まっているのであろうか、などということが問題になる。具体的にいって、例えば地球はエーテルに対して動いているのであろうか止まっているのであろうか。

地球がエーテルに対して動いているかどうかを決めるには、その上でいろいろな方向における光速度を測ればよい。地球がエーテルに対して動いているものなら、その動いている方向に進む光は見かけ上おそく、その逆の方向に進む光は見かけ上、速く伝わるにちがいない。光の速度はエーテルに対し

$$c = 30000000000\ \text{cm/秒}$$

というような大きなものであるが、地球面の速度も相当に大きなものであるから、方向による光の伝わり方の差異は十分に観測にかかるだろう。

この種の実験はマイケルソンとモーレーの二人によってすでに前世紀の終りに行なわれた。しかし結果は否定的であった。すなわち、地球上でどちらの方向に進む光もみな同一の速度 c を持っている。したがってエーテルに対する地球の運動は見られない。

エーテルに対する地球の運動が見られないということは、エーテルが地球にくっついて、地球といっしょに動いていると考えて説明がつくかもしれない。しかし一方、エーテルは他の星にくっついて、それといっしょに動いていると考えねば説明のつかない現象がたくさんに存在する。さらに、エーテルに対する物の運動を決定しようとする実験はこういう光学的現象以外に電気的なものがたくさんに

存在する。これらの実験の結果を総合して得られた結論は、エーテルというものは、自分に対する運動をどんな方法によっても知らせることをしないような性質を持っているということであった。その性質の現われの一つとして、光の伝播の法則は「どんなに運動する観測者からみても同一である」。*

* 実はこの言い方はあまり厳密ではない。厳密には「重力のない場所において互いに等速で運動しているどんな観測者から見ても」と言いかえねばならない。

この最後の事柄は音の伝播の法則とくらべることによってその意味をより明らかにすることができる。音は光と同様に波であるが、その伝播の法則は空気に対して静止している人と運動している人とにとってまったく異なってみえる。空気に対して静止している人にとっては、音の速度はあらゆる方向に同一であるが、空気に対して動いている人にとっては、その動く方向に伝わる音はよりおそく、その動く方向と逆に伝わる音はより速く進むように見える。したがって、この伝播法則の差異を利用して観測者が空気に対して動いているか静止しているかを裁定することができる。

エーテルとは、こういうふうに、空間に充満している媒体であるのに、それが動いているとか止まっているとか、またはそれに対して物が動いているとか止まっているとかいうことを決して人に知らせないような奇妙な「あるもの」だ、ということになった。このような奇妙なものは、われわれが今まで全く知らなかったものであり、したがって、それについての概念をわれわれがまだ一度も所有しなかったような「新奇なもの」である。

十　物理的空間

光波の媒体エーテルは、音の媒体空気とはまったく別種のものであることが前節にのべたように明らかになってきた。これを音の媒体と同様に媒体という名でよぶけれども、この二つが似ているのはただその中に波動的な現象を起す能力を持ち、エネルギーを蓄えることができるという点でだけである。それ以上に、エーテルの運動とか、それに対する物の運動などを問題にしようと思っても、空気とはちがってエーテルはその問題を受けつけない。

それの運動やそれに対する物の運動がどんな手段によっても見ることができないとすれば、そもそもその物に運動とか静止とかいう属性があると考えることが無意味なのであるとしなければならない。エーテルとはその中に波動を起し、エネルギーを蓄えることができるが、それ自身動いていることも止まっていることもなく、物がそれに対して動いていることも止まっていることもないような「あるもの」であると言わねばならない。

この言い方に対し、いったい動いていることも止まっていることもないような「あるもの」などがどうして存在しうるかという反対が起るかもしれない。この反対に対する答は、そういうものを記述する論理的矛盾のない理論体系、**「相対性理論」**が可能であったという事実が答えてくれるのである。前世紀の原子論において、物質の持っている色とか音とか温度とかいうような属性がすべて原子の運

動やエーテルの波に帰着させられ、したがって、原子自身は赤いことも白いこともないような、温かいこともつめたいこともないような「あるもの」であったのである。これに対して、赤くも白くも、温かくもつめたくもない物が存在しうるかという反対も一応起りえたであろうが、矛盾なく論理的に閉じた「**原子論**」の存在は、この反対をやがて沈黙させたのであった。

しかし自身の運動とか、それに対する物の運動とかいう属性を持っていないものに対して、媒体というような名前を用いることは誤解のもとであるかもしれぬ。そこで現在ではエーテルとか、光の媒体とかいう名前の代りに「**物理的空間**」なる言葉が用いられる。このものは運動という属性を持たないという点で「空間」であり、その中に物理現象を現わすという点で「物理的」なのである。

十一　ウェーヴィクル

ふたたび波と粒子のディレンマに立ちもどろう。われわれは電子を不可分の粒子であると考えたが、それはこのものをつかまえると必ず m という質量と $-e$ という電気を持っているという事実によってである。このものの流れを螢光板にあてると、津浪におそわれた町の被害のようにそれが一面に連続的に光るのでなく、砲撃を受けた町の被害のようにぽつりぽつりと光るという事実によってである。こうして電子を一つ二つ数えることができ、いつどこにそれがやって来たかを知ることができるという事実によってである。しかし、こういう点で電子が粒子に似ているからといって、この実験だけか

ら電子であると結論することはまだできない。というのは以上のことがらは粒子の属性のまだ一部にすぎなくて、粒子にはその上に「速度」とか「その運動の路すじ」とかの属性がなくてはならぬからである。

考えを具体的にするために、ふたたびヤングの実験を考えよう。われわれはXのところに螢光板をおいたものとする。ある瞬間に螢光板の一点が光ったことにより、この時刻に電子がそこにあったことを結論することができる。このとき、もし電子が粒子であるなら、その運動の路すじがなくてはならぬから、その電子はAから来たかBから来たかのどちらかであろう。ところがこの考えは干渉の事実とどうしても相いれない。そこでわれわれは、電子には路すじという属性がなく、したがってAかBかのどちらかを通って来たなどという主張は元来意味がないのであると考えねばならない。

こういうと次のような反対がただちに出るにちがいないが、それに対する答はちゃんと用意されている。その反対というのはこうである。

電子がAかBかのどちらかを通ったという主張に意味がないと言ったけれども、AやBのところに螢光板をおいて確かめてみれば、Aが光るかBが光るかのいずれかであって、両方が同時に半分ずつの明るさで光るなどということは決してないという実験事実がある以上、この主張に反対することはできないではないか。このとき螢光板として十分に薄いものを用いれば、実際それを電子が通りぬけることもできる。したがってAやBの孔に薄い螢光板をはりつけたものを用いてヤングの実験を行な

えば、Xの上にやって来た電子が、どちらの路を通って来たかをいちいち検査しながら、干渉の実験を行なうことができるではないか。

これに対して、物理学者は、それでは一度その実験をやってどういう結果になるかをよく見るがよいと答える。すなわち、AとBとのところに薄い螢光板をはりつけたものを用いると、その薄い螢光板を光らせ、したがってどちらの孔を通ったかを人に知らせる材料を作ってしまった電子は、決して干渉現象を現わさないのである。すなわち、そういう電子は干渉縞の暗線のところにも遠慮なくやってくる。干渉を示すのは、途中で螢光板につかまらなく、したがってどちらの孔を通ったかを云々することがまったく意味のないような電子だけである。

結論はこうである。どんな装置でもよいが、二つの孔のどちらか一方を電子が通ったという断定を可能にするような仕掛けを孔のところに設けておくと、この仕掛けにつかまって、そのどちらを通ったかを人に知らせる材料を作ってしまった電子はもはや決して干渉を示さない。こういうわけで、干渉を示すような条件のもとにあるときでも電子はA、B、いずれか一方の孔を通らねばならぬという主張は、ちょうどエーテルが動いているか止まっているか、いずれかでなくてはならぬという主張と同様に実験的に決して拠りどころを見出しえないものである。

このことは光についても同様である。アインシュタインによって光は粒子であるといわれたけれども、この光の粒子は決して常識的な意味の粒子ではない。それはただ個性（不可分性）を持っていて、

一つ二つと数えられ、またある瞬間のその位置を云々することができるという点で粒子に似た何ものかである。光にしろ電子にしろ、それは干渉を示すことができ、干渉を示すような条件のもとにあるときには、その路すじなどを云々できないようなまったく新奇な「あるもの」である。

こういうふうにして、われわれが光や電子について知ったことは、光にしろ電子にしろ、ある点では粒子に似ているが決して粒子の属性を全面的に現わすことはなく、またある点では波に似ているがまた波の属性を全面的に示すこともない何ものかであるということである。それでは、そのものの本体は何であるのか、そしてまたそういう奇妙な性質のものが果して存在しうるのであるかという疑問に対しては、この物を記述する論理的に矛盾のない理論体系、**「量子力学」**が可能であったという事実が答を与えてくれるのである。

通常この新しい量子力学的な物を「量子化された粒子」とか「量子化された波動」とかよぶ。こういう二つの名前を持っているけれども、このものはまったく同一の一つのものであって、粒子でも波でもないまったく新しいあるものである。したがって、たとい量子的という形容詞をつけるにしても、これを粒子とか波動とかよぶことは誤解のもとになるかもしれない。光の媒体を「物理的空間」と名づけたように、ここでも新しい名前が望ましい。しかし一般に通用する公定の名称が存在しないので、エディントンがウェーヴ（波）とパーティクル（粒子）という言葉を半分ずつくっつけてつくった**ウエーヴィクル**（「泣」という文字でもあてるべきであろうか）という名前を用いるのがよいであろう。

しかし、簡単のためにこの後の節でウェーヴィクルと言うべきところにしばしば単に粒子とか波とかいう言葉を用いる。

十二 中間子

ここで話はもとにもどる。われわれは前に核粒子、すなわち陽子や中性子の間に核力が働くことを述べた。そこでふたたび問題となるのは、この核力が二つの粒子の間に直接働くものか、それとも途中の媒体を通じて働くものかということである。これに対して、電気力の場合からの類推によって、やはりこの力も何らかの媒体を通じて働くものであろうと考えるのが自然である。

この媒体が空気のような物質でないことは明らかであろうし、エーテルに関するいろいろな問題によって十分鍛錬された物理学者はふたたびわざわいのもとになりそうな第二のエーテルを仮定するようなことはしない。そこでこの核力も、物理的空間において現われる現象であると考える。

われわれは光の波のほかに（ただしこれは量子化された波と考えねばならぬことになったが）電子の波というものを知っている。そこでわれわれの物理的空間は、光の波以外に電子の波の場にもなりうるものと考えるのが自然である。そうすれば、光の場に付随して電気力が現われたことに相当して、電子の場には何らかの力が付随することもありうる。これが核力ではあるまいか。この考えはいろいろな物理学者の心に同時に起ったことであるが、この考えはついに実を結ばなかった。それというの

も、電子の場を通じて核粒子の間に働く力はあまりにも弱すぎて問題にならないのであった。

一九三五年にまだ二十九歳の弱冠にすぎなかったわが湯川秀樹氏はここで極めて大胆な仮説を提案した。それは、核力は、まだだれも知らない新しい場を通じて作用するというのである。もしそんな場がほんとに存在するなら、この場にも当然波が起るはずであり、しかしてその波も、量子論によって当然粒子の性質を現わすはずである。彼は彼の理論から、この粒子がほんとに存在するならそれは電子の百ないし二百倍の質量を持ち、正または負の電気を持つべきであり、かつ不安定であって約百万分の一秒の後に電子を放出して消滅してしまうであろうと結論した。

この仮説ははじめあまり学者の注意を引かなかった。それは、この仮説があまりに大胆であったこと、なるだけ少ない種類の場によってすべての現象を説明しようとする物理学者の要求、およびそういう粒子をまだ誰も見たものがないという事実のためであった。しかるに一九三七年、アンダーソンはちょうど湯川氏の予言した通りの性質の新粒子を宇宙線の中に見出した。

この粒子は「**中間子**」と名づけられた。その意味は、この粒子が電子よりも重く、核粒子よりも軽く、その中間の重さを持つということである。この中間子の性質は現在なお明らかでない点が多いが、湯川氏の予言の通りに、このものの質量は電子のほぼ二百倍であり、しかも極めて不安定な粒子であって、平均

$$\tau = 0.000002\ \text{秒}$$

の寿命の後に電子を放出して消滅してしまうのである。この予言の的中は世界の学者を驚かせたものであって、今世紀の物理学の大きな話題の一つであった。

十三　素　粒　子

われわれはこうして自然がいろいろな粒子によって作られていることを知った。それはすなわち、電子、核粒子、光子、中間子などである。それでは、これらのものはさらに何かもっと基本的な粒子から作られているものであろうか。

現在われわれは確信をもってこれに答えることはできない。しかし、少なくとも光子と電子とについては、それらが自然界において非常に基本的なものであり、したがってこれらはもはや構造を持たないものであると信ずべき根拠が十分にあるものと考える。その根拠とは次の事柄である。

量子力学によると、光子は粒子と考えられる一方、波の性質をも有している。しかるにその波の媒質は決して物質的なものでなく、物理的空間そのものである。その波動を支配する法則、すなわちマックスウェルの方程式は（この方程式も量子力学的に大きな解釈の変更を行なわねばならないが）極めて単純な形をしている。それゆえ、光子という粒子は、この物理的空間そのものの性質の直接のあらわれと見てよいであろう。

電子についてもまったく同様である。前に電子に対してもマックスウェル方程式と同様に場の方程

式が考えられると述べたが、この方程式はやはり極めて単純な形をしている。しかして、電子場の媒質も決して物質的なものではない。しかしてこの電子場を支配する方程式の形は、電子場の媒質として、たとい第二のエーテルを考えたとしても、それの運動とかそれに対する物の運動などは、決して人につかまえられないというような形をしている。この点からみて電子という粒子も物理的空間そのものの直接のおとし子である。

こういう空間自身のおとしだねであるという点で極めて基本的なものと考えられる粒子に対して、対照として「音子」の場合を考えてみよう。

音は空気を媒体とする波であると考えられているが、この波も量子力学によれば粒子の性質を持っているのである。ただ、この波に属する粒子一個のエネルギーは極めて小さいので通常の音の現象でその粒子性はほとんど問題にならない。例えばピアノのまん中の鍵盤をたたいて出るCの音に属する粒子一個のエネルギーは

$$(h\nu)_{\mathrm{C}} = 0.000000000000000000000167 \text{ エルグ}$$

にすぎない。しかし、通常の音の粒子のエネルギーはこんなに小さくても、超音波の粒子のエネルギーはもっと大きく、さらに固体の中での弾性波の粒子はある種の現象（固体の低温度における性質）においては考慮に入れねばならぬ程度に大きなものである。こうして、量子力学によれば、光が粒子の流れであるという主張と同様に、音とは音源から粒子が放射されるのであると言っても決して誤り

ではない。この粒子には現に「音子」（フォノン）という名が与えられている。

しかし、この粒子は決して空間そのものの性質の現われではなく、空気の性質の現われである。実際また音の場の方程式は、マックスウェルの方程式や電子場の方程式と異なって、その媒体の運動とか媒体に対する観測者の運動とかによって音の伝わる法則が異なってみえるような形をしている。したがって音子は決して基本的な粒子ではない。

陽子や中性子や、あるいは中間子については、現在あまり決定的なことが言われないと言ったのは、それらに対する場の方程式の形がなお明瞭でないからである。しかし、もちろんこれらに属する場が「音子」の場のような物質を媒体とするものではないことは確かである。問題はただ、それらが複合的なものではないかという疑いにある。しかしこの点にいくぶんの疑問を保留しながら、われわれはこれらの粒子をも基本的なものと考えておくことにしよう。こうして、それ以上の構造を持たない、空間自身のおとしだねとみなされる粒子を「**素粒子**」と名づける（厳密にはもちろん素ウェーヴィクルというべきであろう）。

それでは素粒子としてどんなものが現在考えられているかということを述べておこう。それは、今までに述べた**電子**（エレクトロン）、**陽子**（プロトン）、**中性子**（ニュートロン）、**中間子**（メソン）、**光子**（フォトン）のほかに万有引力の場に所属する粒子として**重力子**（グラヴィトン）、および原子核が電子を出して変換するとき必ず伴って射出されると考えられている**中性微子**（ニュートリノ）な

どである。このうち中性子と陽子とは最も重く、中間子、電子の順でこれにつづく。そして光子、重力子および中性微子は質量がゼロであると考えられている。ただし、後の二つのもの、すなわち重力子と中性微子とは、理論から言って存在するはずだと考えられるだけで実際その粒子を見たものはまだない。さらに電子については、はじめ負の電荷のものだけが知られていたが、後には正の電荷のものも存在することがわかった。これらの素粒子に対して、原子とか、α粒子とか、または原子核とかは「複合粒子」であるし、音子などというものは基本的でない二次的な粒子である。

十四　保　存　量

十九世紀的な原子論から以上のような路を通って、われわれは現在の素粒子論に到達した。この素粒子論は、ある意味で前世紀の原子論およびギリシャの原子論の拡充であるが、これらのものと素粒子論の間には次の点で大きな差異がある。

それは、素粒子は決して不生・不滅・不変なものと考えられていないことである。例えば電子は適当な状態におくと光子を生むことができ、中性子は電子を生んで陽子に変化できると考えられている。前にも述べたように中間子のようなものは、電子と中性微子とを生んで自分は消滅してしまうので、百万分の二秒というような短い寿命しか持つことができない。

電子が光子を生むことができる云々といったが、これを前世紀的な言葉に翻訳すると、電子が振動

状態にあると周囲のエーテルを攪乱してそこに光の波を発生するということである。ところで静止している電子は光の波を発生することはないが、そのまわりに電場を持っていて他の荷電粒子を引きつけたり反撥したりすることができる。これを現代の素粒子論の言葉でいうと、電子はその周囲に絶えず光子を生んではふたたびこれを吸収しているのである。このとき、電子が静止していた場合には生まれた光子は十分なエネルギーの供給がないので、外界に光線として発射されることはなく、自分の親であるところの電子のまわりにふんいきのようにまとわりついているにすぎない。しかし、電子が振動状態にあると、この電子の運動のエネルギーがこの光子に与えられて、これは親を離れて外界に巣立って行くことができる。

さらにまた二つの荷電粒子が電場を通じて作用し合うということを、素粒子論的に言うと、一方の粒子の産んだ光子が他方の粒子によって吸収されるということが絶えず行なわれる結果として、二つの帯電粒子の間に光子を通じてのエネルギーや運動量のやりとりが起るということである。

同様なことは陽子と中性子との間にも中間子を媒介として行なわれる。すなわち、陽子も中性子もたえず中間子を産んではふたたびこれを吸収するという営みをつづけて、そのまわりには、これらの産みの子のふんいきがまとわりついている。このとき、二つの陽子と中性子とが十分近づいて、一方が他方のふんいきの中に入りこむと、ここでそれぞれの生んだ中間子の交換が可能になり、それを通じて陽子と中性子とはエネルギーや運動量のやり取りを行なう。これが前世紀的な言い方で、核力を

通じて核粒子が作用し合うといったことの素粒子論的な見方である。原子核の中ではこの営みが絶えず活潑に行なわれていて、核粒子の間には産まれ、かつふたたび吸収される中間子のふんいきが満ちている。

これら一つの素粒子のまわりにふんいきとなってまとわりついている子供の粒子たちは、通常エネルギーが不足のため外部に向って洩れ出ることはない。しかし何らかの形でエネルギーの供給があると、それらの子供は親をはなれて外界に巣立っていく。電子が光子を放ったり、原子核が電子と中性微子を放ったり、中間子が電子を放出して消滅する現象はこれである。これらの現象のうち非常に大規模に自然界で行なわれているという点でセンセーショナルなのは、宇宙線が空気中で行なっている現象であって、一つは中間子の発生であり、一つは「シャワー」という現象である。

電子は自分のまわりに光子のふんいきをまとっているが、光子は自分のまわりに正と負の一対の電子をまとっている。* そこで大きなエネルギーで走っていた電子が急に何かに衝突して速度を失うと、そのとき余ったエネルギーがその子供の光子に与えられて、この光子が外界に飛び出す。この光子はそのまわりに正負の電子をまといながら空中を飛んでいくが、その途中で物質原子に遭遇すると、ここで急に消滅して自分の持っていたエネルギーをその双生児であるところの正負の電子につたえる。ここでこの双児は外界に猛烈なエネルギーをうけついで飛び出して行く。ところでこの双児は、さらにまた自分の祖父であった電子と同様なことを行なう。こういう過程は宇宙線の中にある非常に高い

エネルギーの電子や光子によって空気中でくりかえし行なわれるので、大気の上層においては少ししかなかった電子や光子が、大気中でネズミ算的に増殖して行くのであり、またこれが空気中でなく固体の内で行なわれ、一個の電子や光子が固体を貫通すると、他の側では数十個ないし数百個に増殖して現われてくることも稀ではない。このとき数百個もの電子や光子は雨あられのように現われるので、これをシャワーと名づける。宇宙線の中で中間子が作られる機構はまだこのようには明らかにされていないが、とにかくわれわれが観測する中間子はすべて地球外から大気の中に入射する何かよくわからない粒子（それは多分陽子であろうといわれている）によって、エネルギーを供給され空気の原子核の中から産み出されたものと考えられている。

＊　この言は厳密でないがかんべんしていただこう。

こういうふうに素粒子は互いに変換したり、消滅したり発生したりする営みをたえず活潑に行なって一時も休んでいない。しかしこのとき、不生・不滅・不変に保たれる量、すなわち「保存量」が存在する。

それはまずエネルギーである。すなわち、一つの素粒子が他のいくつかの素粒子に分かれても、そのとき、エネルギーは決して変化することはない。ただしこのときエネルギーといったが、これは運動のエネルギー以外に質量をもエネルギーとして計算に入れねばならない。

質量とエネルギーとが別のものではないという考えは、相対性理論によって得られた注目すべき結

論である。けれどもそういう考えにどうして到達したかを残念ながらここで述べるわけにいかない。しかし、とにかく事実として、質量一グラムは

$c^2 = 900000000000000000000$ エルグ

に換算される大きなエネルギー*を持っていることが実験的にも明らかにされているのである。そこで例えば電子の二百倍の質量の静止していた中間子が消滅して、電子と中性微子とを生んだとすると、この二つの子供に受けつがれるエネルギーは

$200 \times m \times c^2 = 0.00018$ エルグ

であり、そのうち

$m \times c^2 = 0.0000009$ エルグ

は、電子が質量の形で持つべきエネルギーであるので、その残りだけが電子および中性微子の運動のエネルギーとなるのである。

* このエネルギーは大体原子爆弾一発のエネルギーに相当する。

さらに素粒子の変化のときに不変に保たれる量として、運動量と角運動量とがある、またこういう力学的な量のほかにその電気量が全体として変化の前後において不変でなくてはならない。これらの不変量の上にさらに量子力学は、素粒子の統計的性質の不変という要求を付け加え、このことは実験的にもよく確かめられている。しかし統計的性質の保存ということの詳しい意味の説明はここでは割

愛せざるをえない。

十五　？

以上述べたようにして、われわれは目にみえる物質の世界から原子の世界へ、原子の世界から原子核の世界へ、さらにまた原子核の世界から素粒子の世界へと入りこんで来た。こうして一段一段と進むにつれて、物理学者は人間界から遠い場所へ入りこんで行く。そうして、このように人界をはなれた辺境の場所に入りこんでみると、そこには物理的空間とかウェーヴィクルとかいうような、われわれの日常世界で見たこともなかったような新奇なものによって構成された世界があることがわかった。したがってこの場所で自然がわれわれに示してくれる風景を記述するには、われわれが全く知らなかった概念を用いねばならない。ところでわれわれの日常の言葉はあまりにも日常的な概念の重荷を負いすぎているので、これらの世界における自然の法則を綴るだけの自由さを持っていないのである。それゆえ、これらの新しい世界で用いられる言葉はもっと純粋であり、それだけ自由なものでなければならない。そういう言葉は、すなわち数学である。これが物理学の形が次第に数学的・抽象的にならねばならぬ理由である。

物理学はいつも、新しく発見された現象か、あるいは今まで全く別種の領域の現象として離れて考えられていた現象を統一的に包括しようとして進歩して行くのであるが、このとき進歩の仕方に二種

の別がある。一つは今までにあった理論をそのまま単に新しい現象に適用するだけで事のすむ、いわば本質的でない進歩であり、他の一つは、全然新しい理論を、全く新奇な概念の上に組立てなおさねばならない本質的な変化である。

われわれは目に見え、手に触れる現象世界の物理学から、原子の物理学、さらに進んで量子の物理学、素粒子の物理学へと歩んで来たが、それぞれの段階は決して前の段階の理論を単に寸法の小さな対象に適用しただけではない。これらの場合、物理学が一つの段階から次の段階に移るに際して前の段階において用いられていた概念の一部がすてられて、全く新しい概念を用いねばならぬという事態が起った。

それは一応論理的に矛盾なくまとまっていた一つの段階の理論の中に今まで包括されていなかった新しい現象を統一的に包括しようとするとき、その理論が矛盾に満ちたものになったからである。このとき、いつも新しい概念の発見によってこの困難が乗り切られるのである。

一例をあげよう。われわれの目に見え、手に触れる現象を個々別々に取り扱っていた古い物理学から、これらを統一的に取り扱う十九世紀の原子論に移るとき、まず「原子」という前段階の世界には存在していなかった新しい概念が導入された。この概念が全く新しいものであるという理由は、前の段階では赤くも白くもなく、温かくも冷たくもない物などは存在しなかったからである。こういう新奇なものを理論に導入しなければならなかった理由は、原子自身が色や温度を持ち、それらが物に現

われる色や温度と関係しているという考えでは、物の性質を矛盾なく統一的に理解することができないからである。次に相対性理論においても事情は同様であり、ここでは通常の媒体概念は捨てられて、動いていることも止まっていることもない媒質、すなわち物理的空間という考えが導入された。さらに量子論的の段階では、通常の粒子概念はすてられて、一つ二つと数えられ、またそれの破片などは決してつかまえられないのに、壁にうがった二つの孔のいずれか一方だけを通過するという断定を必ずしも許さないウェーヴィクルなる新奇のものが登場した。

こうして、われわれが次第に身近いありのままの自然から離れて行かねばならぬことは、ある意味では悲しいことかもしれない。しかし、これを行なわなければ自然は決して矛盾のない統一的な、しかも客観的な存在としてわれわれにとらえられないのである。しかも、考えてみればこのことは、われわれの素朴な日常生活において健全な常識がすでに行なったことを延長したにすぎない。すなわち、日常われわれは客観的な物がわれわれをめぐる三次元の空間中に存在していると考えているが、そのことはすでに抽象化の一段階を行なっていたのである。

具体的な例をとって、われわれの前に一個のピラミッドを想像しよう。われわれの常識は、この物が上から見れば四角に、横から見れば三角に見えることを何の不思議ともしない。しかし、われわれが何らの抽象化を行なわず、われわれに最も具体的かつ直接な視覚的印象にのみ固執する、いわば常識よりも以前の素朴な立場にいるなら、このものはある見方では三角に、ある見方では四角に見える

奇妙なもののわけである。さらに触覚によってわれわれのとらえるこのものと、この三角あるいは四角との間には何の関係もない。こういう立場においては自然は見方によって三角に見えたり、四角に見えたりいろいろ変形し、したがって客観的な法則などが存在するとは考えられぬような矛盾にみちたものであろう。しかし、この矛盾は視覚的な形にのみとらわれることをはなれて、三角でも四角でもない新たな立体という概念を発見することによって取り去られ、それとともに視覚的な世界と触覚的な世界とが一つの世界像の中に包括される。

エーテルに関するいろいろな矛盾や、波と粒子とに関するディレンマをわれわれが乗り切ったやり方も、ひっきょうこの日常的方法の延長である。電子や光が、ある見方によれば粒子のように、また他の見方によれば波のように現われるということは、一時、極端な学者をして、電子や光の客観性を疑わせたこともあったけれども、これはピラミッドが三角にも四角にも見えるという事実と同じ意味のものと考えるべきであろう。差異は、ただピラミッドという立体はそれほど抽象の程度がはなはだしくないので、別にものものしい数学的言葉を用いないですんだという点にある。これに対し「立体的」にウェーヴィクル概念を規定するには、一般の人びとには極めて気味の悪い数学の洪水を用いねばならない。

一つの段階の理論においてはとうてい存在できそうにも見えないような矛盾にみちた物が次の段階の理論で矛盾なく存在しうるということは、もちろん一つの段階から次へうつるとき大きな考え方の

飛躍を要求する。通常このことは、前の段階で自明であるとして何の疑いもなく仮定されていたことが自明でもなく、かつ正しくもなかったということの発見の形で行なわれる。例えば通常の考え方ではとても考えることもできないところの「動いても止まってもいない光の媒質」が矛盾なく存在しうるのは、通常の考えで自明であるとされていた**時間の絶対性***が決して自明でもなくかつ正しくもないというアインシュタインの発見によって明らかになったのであり、「破片となってつかまるようなことは決してない不可分のものであるのに、二つの孔の一方だけを通るとは断言できない」というような奇妙なものが矛盾なく存在しうるのは、通常の考えでは自明とされていた**決定論的因果律****が決して自明でもなく正しくもなかったというハイゼンベルクの発見によって明らかになったのである。こういうことが問題になる場合にはいつも哲学的ないろいろの議論が活潑に行なわれ、この点でいろいろな人の間に意見の喰いちがうことも稀でないが、これも別に物理学の理論に至ってはじめて起ることではなく、われわれ日常の常識的「理論」においても哲学はいくらでも問題を見出しており、ここでも多くの人の間に意見の一致を見ることは極めてむつかしいことである。

* 時間の絶対性とか相対性とかいうことの意味を少し説明しておこう。時間が絶対性を持っているという立場に立てば、例えば同時に二つの出来事AとBとが起ったということは、絶対的な意味を持つことであって、どんな人が見ても、この二つの出来事が同時に起ったということに変りはないという考えに導かれる。時間の絶対性を否定したアインシュタインの相対性理論では、この同時性というものは絶対的な、出来事自身に

属した性質ではなく、ある人にとってはAがBより前に起ったとしても、他の人にとってはBがAより前に起ったと判断されることもあるというのである。こうして時間の前後という関係も、一つのものが他のものの右にあるとか左にあるとかいう関係と同様に、それを見る人の立場によって異なることがありうるというのである。

＊＊ 決定論的因果律というのは、物理学的に全く同一の条件のもとにおかれた物理学的対象は、観測においてあらゆる点で全く同じ結果を与えるという法則である。ところがウェーヴィクルに対してはこのことが成立しないというのがハイゼンベルクの考えである。すなわち全く同一の条件で電子線を作り出し同一のスリットを通してみても、その背後にシンチレーション用の螢光板をおいてみると、ある場合にはAという場所が光るであろうし、また他の場合にはBという場所が光るのである。すなわち決定論的に、必ずAが光らねばならぬとか、必ずBが光らねばならぬとかいう主張は成立しない。

最後に、それではわれわれが現在持っている素粒子論的物理学が「物理的空間」と「ウェーヴィクル」という二つの概念を用いて矛盾なく記述されているのであるかという問題が残ったことになる。これに対する答は残念ながら否定的である。われわれは現在粒子性を無視した純粋の波に対しては論理的にまったく矛盾のない物理的空間における波動論を持っている。また物理的空間を土台にしないなら、十分論理的に閉じたウェーヴィクルの理論を立てることに成功している。しかし前の理論は波動の粒子性という現象を包括しないし、後のものは光の場や、一般に空間それ自身を媒質とする場の現象を包括することはできない。そうして、この二つの理論を総合してわれわれが「物理的空間のお

を作ろうと思うと、今のところ打ち勝つことのできない矛盾にぶつかってしまう。しかもこの矛盾はまだ十分に整理されきらずに、どこまでが実験の誤りであるのか、どこまでが理論を適用するときの計算法の誤りであるのか、あるいは新しい種類の素粒子を考えたり、素粒子の性質を変えてみたりすることによって、別に新しい概念を導入して新しい段階に飛躍することなくして救われるものであるのか否かも明らかでない。しかしこの矛盾の中に古い概念をすて全然新しい概念にうつらなければ乗り切ることのできない本質的なものも存在することは十分確からしく見える。こうして物理学は再び大きな飛躍を行なって新しい革命的な段階に移ろうとしている。これがいつどこの誰によって、どういう形に行なわれるかは目下のところ全くわからない。この意味でこの論稿を大きな疑問符で終ることにしよう。

（一九四七年九月）

（『原子核から素粒子へ』、一九四九年、『科学と科学者』収録）

量子力学的世界像

一

理論物理学は今日一つの困難に出会って、何か根本的に考えを改めない限りわれわれは先に進むことが出来ない。それは、相対性理論から要求される「場」の概念とプランクの「作用量子」の概念とが、現在のままの形では互いにうまく溶け合ってくれないのである。こういう状態にあって、一応現在の量子力学的世界像がどんなものであるかを述べ、われわれの足場を固めると同時に、困難がどんな形で現れてくるかを読者諸君に聞いていただこう。

それには歴史的な話をしていくのが便利である。量子力学はまず光の速度ほど速く動かない対象についての法則として出来上った。すなわちまず完成されたのは非相対論的な量子力学であった。初めのうち大概の物理学者は楽観的に、数学的な形をもう少し一般化すれば、この理論を相対論的にして、

光の速度に近い物にあてはまる理論を作り得るだろうと考えていた。そして実際にもまたこのような方法で今日「素粒子論」と呼ばれる理論が作り上げられ、これは物質を構成するいろいろな素粒子の性質を決める理論として有効な役目をしている。この理論がどんなに有効であったかは、陽電子や中間子などの新しい種類の素粒子の発見がどちらも実験的な発見の前に理論によって予言されていたことから見ても明らかであろう。

しかし、この種の理論、すなわち非相対論的な量子力学から単純な数学的一般化で得られた理論は、このように有効な一面をもっているけれども、自然現象のごく一部しか記述する力をもっていない。この部分の外にまで理論をおしひろげようとすると、ただちに矛盾につきあたる。矛盾というのは、そうして得た理論が数学的に解をもたないものになるのである。

二

われわれはまず理論の有効な部分を述べて行く、その準備として量子力学に関する議論でいつも聞かされる「粒子と波動」の問題から出発する。

プランクがこの世紀の初めに量子を発見する前に、空洞輻射のスペクトルの問題は自然がわれわれに示した謎であった。ニュートン力学やマックスウェル電気力学に従うなら、ある温度の壁でとりかこまれた空洞の中の輻射スペクトルは、熱的釣合の状態では、すべての波長の光がみな等しい強さを

もっているというふうになる。そして壁の温度を一度（摂氏）上げるごとに、このおのおのの波長の光は、それぞれのエネルギーを 1.38×10^{-16} エルグずつ増加するというように一斉に強くなる。この 1.38×10^{-16} エルグという量は、小さいものと考えられるかもしれないが、空洞内にはいくらでも短い波長の光が起り得るのだから「すべての波長の光」と上にいったことは、全体として無限大 $\times1.38\times10^{-16}$ エルグのエネルギーを意味する。壁の温度を一度上げるには無限大のエネルギーを供給しなければならないというのが、理論から出る結論である。しかしこれはもちろん実験とあわない。

この困難をプランクはエネルギー素量の考えで救った。彼の考えを一口に述べると次のようになる。すべての物体が連続体でなくて、最小でそれ以上分けることの出来ない原子から作られているように、輻射のエネルギーも連続量でなく、ある最小であってそれ以上分けられない素量から出来ている。この素量の大きさは、問題にする輻射の振動数が大きいほどそれに比例して大きい。例えば、赤の光の素量は 2.6×10^{-12} エルグであるのに、それより振動数の大きい紫の光では 5.2×10^{-12} エルグである。一般に光の振動数を ν と書くなら、素量の大きさは $h\nu$ で与えられる。この比例定数 h はプランクの作用量子といわれるもので、cgs単位系を用いてエネルギー振動数を表すなら、h の大きさは 6.6×10^{-27} である。このエネルギー素量が振動数に比例している結果として、ν の小さい光においては、この素量は問題にならぬくらいに小さい。しかし ν の大きい光では、この $h\nu$ は相当大きくなる。こういうことがあると、エネルギーの原子的構造を考えないニュートンやマックスウェルの理論から

出た 1.38×10^{-16} エルグという量は変更を要する。実際例えば紫の光の $h\nu$ は 5.2×10^{-12} エルグであったが、古い理論では温度が一〇〇〇度（摂氏の絶対温度）くらいに上っても、この光は $1000\times1.38\times10^{-16}$ エルグしかエネルギーをもち得ないことになる。しかしプランクに従えば、$h\nu$ より小さいエネルギーを光がもつことは出来ないのだから、紫の光はこんな程度の温度ではほとんど強さは零である。物体を熱して光を出させる時温度が低いと赤い色の光しか出さないのはこの事実の現れである。温度をもっと上げて紫の光まで出すようにすれば、物体の放つ光は白い色になる。こうして短い波長の光にはエネルギーが少ししか分配されないことになるので、上の無限大は起らなくなる。

三

このエネルギー量子の考えは、マックスウェルの光の電磁波論と非常に矛盾した事柄を要求する。マックスウェルの理論では、場の理論の一般的特徴として、光のエネルギーが空間に連続的にひろがっていると考える。この考えと量子の考えとが矛盾することは、次のような場合を考えればほぼ明らかにされる。

十分大きな空洞内に一定の波長の光が満ちていたとしよう。プランクの考え方によって、この光のもつエネルギーは $h\nu$ の一倍、二倍、三倍……というような値でなくてはならない。$h\nu$ の $\frac{1}{3}$ 倍とか $\sqrt{\pi}$ 倍とかいう量はあり得ない。つぎにこの空洞の壁に孔をあけたと考える。光はこの孔から外にも

れ、したがって、空洞のエネルギーはだんだん減る。しかしこのエネルギーは $h\nu$ の整数倍でないといけないのだから、連続的に減ることは出来ない。文字通り「だんだん」と、一だんは $h\nu$ ずつ減る。ところで、空洞の中にある光のエネルギーが非常に稀薄に分布しているとすると、場の理論の考えのようにエネルギーが連続的に空間に分布しているなら、$h\nu$ だけのエネルギーは、非常に大きな空間にひろがっているものをかき集めなければ得られない。こうして、孔からはるか後方にあるエネルギーが一瞬にかき集められて孔から外に出なければならない。こんなことはマックスウェルの理論ではあり得ない。

こういうことから、プランクの仮説は、これまでいわれていたように光のエネルギーが空間にひろがっているのでなく、点状の塊として空間内のところどころに凝集していることを要求する。この一つの塊の量が $h\nu$ である。いいかえれば、光は粒子から構成されている。これがアインシュタインの光量子の説である。彼によれば、赤の光線は 2.6×10^{-12} エルグの光の粒子が光速度で飛んでいるものと考えねばならない。

この光の粒子仮説は光電効果という現象で直接証明された。すなわち、光を物体にあてると物体の中にあった電子が光からエネルギーをもらって外に飛び出して来るが、この時、電子の受取ったエネルギーを測ってみると、光の強さなどに無関係に、そして光が一定の振動数 ν をもっているものだと、ちょうど $h\nu$ である。こうしてアインシュタインの説は実験によって裏書きを得た。

しかし光の粒子説は他方で非常な困難を含んでいる。すなわちこの説では、光の干渉とか回折とかが説明されない。光電効果が光の粒子説に裏書きを与えたのと同じ程度の確かさで、これらの現象は光の波動説に味方をしている。

こうして「場」の概念と「作用量子」の概念とが、ここで溶け合わないものとして現れる。しかしここでいう意味の矛盾は量子力学の完成で一応の解決を得た。つまりわれわれの対象に対して「波動」あるいは「粒子」の概念を用いることが、どちらもある面では正しいが、全面的には正しくないということが明らかにされたのである。

四

ここで量子力学がどんな解決をこの問題に与えたかを述べよう。

光がある現象では粒子のように、他の現象では波動のように振舞うことが実験的に明らかにされたのであるが、これを矛盾なく一つの仮説から導出することは果して出来るだろうか。われわれのもつ波動とか粒子とかの概念は、一つのものがそのどちらでもあるなどという解釈を許すものではない。だから光が波動でありかつ粒子であるというようないい方はたしかに矛盾に満ちている。

しかし、矛盾矛盾という前に、実験事実をもっと冷静に調べねばならない。そこで、光が粒子であるとの結論の根拠となった光電効果の実験を調べてみると、電子に対する光のエネルギーのやりとり

は $h\nu$ かあるいは0であって、その途中の値 $\frac{1}{3}h\nu$ などにならない、という事柄以上の内容をもっていないことがわかる。この実験事実に対してただちにわれわれの日常概念の「粒子」をもって来ることは、われわれの想像によって実験事実を事実以上に補っている。同様に光が干渉を示すということは、光に位相という属性のあることを示す以上の内容をもっているのではない。これに対してただちに「波動」を連想することもやはり同様である。量子力学以前では、エネルギーのやりとりにおいては、素量的な性質を有し、かつ空間内の場所場所で位相をもつことの出来るようなあるもの、というような概念をわれわれは所有しなかったのであるが、自然がこういうものの存在を示した以上、われわれは幼児が己れのまわりにある物について概念を構成して行くように、この新しい物についての概念を作らねばならないし、またそれは必ず可能であろう。

量子力学はこのようなあるものの概念を明確に矛盾なく規定することに成功した。このものは波動でもなく粒子でもなく、全く新しいものである。混乱の起るおそれのない場合に、物理学者は量子力学でもしばしばこのものを、粒子とか波動とかいう名称で、あるいはせいぜい「量子化」されたという形容詞をつけて用いる。しかし「量子化された粒子」と「量子化された波動」とは別個のものでなく、一つのものの名前である。ヨルダンがいっているように、この量子力学的なあるものはわれわれが今まで全く知らなかった新奇なものであるけれども、われわれの世界像はそれだけ単純になったことを意味する。すなわち、量子力学を知る前に、われわれは自然界には波動と粒子と二種のものが存

在すると考えていたが、こうして実際には、ただ一種のものだけが存在することになったからである。

量子力学的世界像を構成しているすべての要素、すなわち、原子も電子も陽子もあるいは光もいずれもが、こういう量子力学的な「あるもの」である。そして電磁場というような場の概念も、その場に現れるものが通常の意味での波動でないような工合に、あらためて量子力学的に姿を変えることになる。

この量子力学的な「あるもの」に適当な名称を与えることが望ましいが、現在物理学者に一般的に用いられているものがない。あまりよい名前ではないが、いつまでも「あるもの」ということを繰返すのも面倒であるから、エディントンに従って、これをウェーヴィクル（wavicle）と呼ぶこととしよう。

このウェーヴィクルの概念を明確に規定することは、数的な表象によらなければほとんど不可能である。それは、われわれの日常生活中にこんなものが現れたことがなかった結果として、その規定は量子力学の数学的法則の全体と切りはなして行なうことが出来ないからである。しかし数式をならべたてて読者を悩ますことは本論の目的ではない。ここでは、この量子力学的世界の風景を、ぼんやりとでも読者諸君の頭の中に浮ばせるだけで満足しなければならない。これはちょうど音楽や絵画を文字で表すようなものであって、非常にむずかしいことであろうが、出来るだけの努力をしてやってみよう。

五

まずいい得ることは、ウェーヴィクルは、それの「位置」を測定することが出来る、それの「運動量」を、それの「エネルギー」を測定することの出来るあるものである、ということである。また、ウェーヴィクルの「位相」を、その「振幅」を、それの「波長」を測定することも可能である。しかし、通常の粒子であったならば、その位置と運動量とを同時に測定することが可能であったが、ウェーヴィクルの位置と運動量とを同時に測ることは出来ない。また日常の波動のように、ウェーヴィクルの振幅*と位相とを同時に測定することも不可能である。われわれのウェーヴィクルとはこんなものである。

* 厳密には振幅の二乗。

これだけの事柄では、まだウェーヴィクルの概念は規定されない。これから先は数学的な話になるのであるが、読者諸君はしばらく我慢して聞いていただきたい。しかしその前にちょっと注意しておくのは、ニュートンやマックスウェルの理論に現れた粒子や波動の概念といえども、決して素朴な日常的なそれではないことである。前世紀に完成された古い物理的世界像では、これらのものがその構成要素になっているわけであるが、この世界像について誰であったか、物理的世界には色もなく音もなくただあるものは運動だけであるといっていたように、これらの粒子については、その色などを問

題にすることは意味がない。温度などという属性ももつことが出来ない。波動についても同様であって、それが波動であるという意味は位相と振幅とを云々することが出来るという以上のものではなく、それ以上にわれわれの想像によって、その波の色や音を考えることは許されない。全く素朴な立場からいえば、色をもたず温度ももたない粒子とか、色もなく音も伴わない波動などというものは存在することが出来ない、と主張することも可能である。だから、すでにこの古い粒子や波動の概念も実は数学的な表象を用いなくては明確に規定することの出来ないあるものである。これだけの前置きをして先へ進もう。

いろいろなウェーヴィクルから構成されている物理的な系があったとする。一般に物理学的な対象においてそうであったように、この系を対象として出来る限り多くの測定実験を行なうことによって、この系の状態が決定される。もし系が古い理論の場合のようにいくつかの粒子から構成されているのなら、すべての粒子の位置と運動量とを実験的に測定してその値がそれぞれこれこれであるということが決まれば、それでこの系の状態が決定されたことになる。しかし、系がウェーヴィクルから出来ているのだから、前に述べたように、おのおののウェーヴィクルの位置を測定すれば、同時にその運動量の測定を行なうことは出来ない。出来る限り多くの測定と上にいったが、この測定の個数がウェーヴィクル系の場合は古い理論の物理系の場合のそれよりはるかに少ない。

測定実験というものは、対象の状態を知るという受入れの作用と同時に、一定の状態の対象を作り

出すという働きかけの作用がある。粒子の位置と運動量とがこれこれの値をもっているということが測定されれば、それでその見出された値の位置と運動量とをもった粒子系が作り出されたことになる。上述によって、一定の状態のウェーヴィクル系を作り出す目的で行ない得る測定実験の個数は、古い粒子系や波動系の場合のそれより少ない。

ウェーヴィクルというものがこんなものであるとすれば、その波動性と粒子性とが矛盾すると主張する根拠は失われる。すなわち、干渉を示すような測定実験によって作り出された光は、その実験で決められた位相*の状態にある。しかし、光がウェーヴィクルである以上、この上にその振幅を、したがってそのエネルギー分布を、測定することは出来ない。だから、この状態において光のエネルギーが塊となって空洞中のどこを飛んでいるかを問題にするのは意味がない。同様に、光が粒子性を示すような実験を行なって、エネルギーが $h\nu$ の塊となってある場所に存在していたということが測定されたとすると、その上に光の位相を測定することは出来ない。だからこの状態において光が波動として空中に伝わるかどうかの問題は影をひそめる。そして実際にもこの状態において光は干渉を示さない。

* 厳密には位相差といった方がよい。

光の位相を測定すれば同時にその振幅の測定を行なうことが出来ないということを述べたが、その「同時に……出来ない」ということの意味を説明する必要があるかもしれない。光についてこの二つ

の測定が「同時に」不可能であっても、まずその位相を測定しておいてそのすぐ後にその振幅を測定すればよいではないか、と考えられるかもしれない。しかし、ここでいう同時とは実験を行なう時刻を問題にしているのではなく、位相と振幅とが通常の波動のようにともに決まった値をもつような状態を作り出すことが不可能だという意味である。実際に、光の位相を測定しておいても、その直後に振幅を測定すると、その後には光は干渉を示さない。すなわち振幅測定の実験によって、その前に行なわれた位相測定の実験は全く無駄になってしまう。振幅測定の後の光の状態は、新規まきなおしにその後の実験で得られた振幅の値だけで決まってしまって、その前に得られた位相のデータはその後の事柄に対して何の意味も影響もない。ウェーヴィクルというのはこういうものである。ウェーヴィクルの状態は一般には、状態決定の測定実験を行なうたびごとに新規まきなおしに決まるのである。これを測定がウェーヴィクルの状態に影響するのだといってもよい。

それでは、位相の決定しているような状態に光を作り出しておいて、次にその光に対して振幅を決定する測定を行なったら、どういう測定結果が得られるであろうか。その結果は決定論的に決定されていなくて、実験のたびごとに異なった値が、しかもあらゆる可能な値が、等しい確率をもって現れる。前に簡単に「同時に……出来ない」といったが、この簡単な言葉の中にはこの事実も含まれているものと解釈していただきたい。もし振幅の測定値が一つの値に決定されて出て来るなら、位相状態を決定する実験によって同時に振幅もこの値に決定された、と考えるべきである。

数学的な表象を用いないでウェーヴィクルについて述べられることは、これで大体つくされたように思う。それでは以上のようなウェーヴィクルの性質をすべて含み、以上の話の中には述べてなかったようなもっと一般的な測定実験の間の関係をも含み、かつ論理的に矛盾なく明確にウェーヴィクル概念を規定する数学的な表象はどんなものか。それは次のようにファンタスティックなものである。

六

ウェーヴィクルから構成される物理系があったとする。そうするとその系の状態は、一つの無限次元の複素数的空間の原点から引かれた一本の単位ベクトルで表現される。複素数的空間という意味は、その中のベクトルやテンソルの成分が複素数であるということであり、無限次元というのは、そのベクトルやテンソルの成分が無限個あるということである。次に、われわれが測定実験によって測定し得るもの、すなわちウェーヴィクルの位置とか、運動量とか、あるいはエネルギーとか、それからまたその位相とか、振幅とか、そういう種々の量は、それぞれこの空間内のテンソル*で表現される。あるいはもっと具象的な描写を好むなら、これらの量はそれぞれこの空間内の原点を中心とする楕円体で表現される、といってよい。これらの楕円体は空間の次元の個数だけの主軸**をもっているが、この主軸のおのおのはその量を測定した時、得られる可能な値の逆数の平方根に等しい長さをもっている。***

いま、ある量Aを測定してaなる数値を得たとする。そうすると、この測定がウェーヴィクルの状態

に影響して、その測定の以後には状態を表すベクトルは、この量Aに属する楕円体の$\sqrt{1/a}$の長さの主軸の方向をとる。前に測定によって新規まきなおしに状態が決まるといったのはこのことである。次にこういう方法である決まった状態の系を作り出しておいた後、Bという値を測ったとする。Bはいろいろの長さの主軸をもっている。その主軸の長さを$1/\sqrt{b_1}$, $1/\sqrt{b_2}$,…とすると、このb_1, b_2, …なる数値がBのとり得る可能な値であることはすぐ上に述べた通りである。しかしその時そのBの測定でその中のどの値が得られるだろうか。前に述べたように、この値は一般には決定論的に決定されないで、ただいろいろの可能な値に対する確率が理論的に決められるだけである。

* マトリックスといってもよい。

** 楕円体の主軸というのは、その中心から引いた直線のうちで、それが楕円体の表面を貫く所でその表面に垂直になっているものをいう。主軸の長さとは、この直線の中心から表面を貫く点までの長さのことである。二次元空間の楕円体は通常の楕円であり、その主軸とは長径、短径といわれる二本の直線である。三次元の楕円体はラグビーの球のような形をしている。ただしラグビーの球は輪切りにすると切口は円になるが、一般の三次元楕円体は、その切口もたて切りにした切口と同様に、楕円になる。三次元以上の次元になると、無限次元ではもちろんのこと、楕円体というものを幾何学的に表象することは困難になるが、これは類推でおおよそを察して頂きたい。解析幾何学では二次元の楕円を、x、yの二次の方程式で、また三次元の楕円体は、x、y、zの三次の方程式で、それぞれ定義したように、解析的な立場からいうと、次元を増すということは、ただ変数の個数を増すことである。こうしてわれわれの無限次元の複素空間なども、解析的な立

場からなら何の困難もなしに取扱い得るのである。

*** 可能な測定値は負になることもあるから主軸の長さが虚数になることもある。この時、楕円体は双曲面体になる。

この確率を算出するには次の手続きをふめばよい。すなわちこのBの測定で、例えばbなる数値が得られることの確率を算出しようと思えば、まず状態ベクトルを$1/\sqrt{b_1}$の長さのBの主軸に射影してみてその影の長さを求める。次にこの影の長さの二乗を作る。そうするとそれがちょうど求める確率である。この測定でb_2なる数値の得られる確率を計算しようと思うなら、同様のことを$1/\sqrt{b_1}$の長さの主軸について行なえばよい。

ウェーヴィクルの概念の数学的規定は大体これですんでしまった。実験測定とこういう性質で関係しているものをウェーヴィクルと名づけるというわけである。

この数学的な話をもう少し身につけるのに次のような例題的な考察が役立つかもしれない。特別な場合として、状態ベクトルが一つの楕円体のどの主軸かの一つに非常に近い方向をとっていたとする。そうすると、状態ベクトルがこの主軸の上に投げる影の長さは、ベクトル自身の長さにほぼ近い。したがって影の長さはほぼ1である。楕円体の主軸は互いに直交しているから、この時、ベクトルが他の主軸に投げる影はみな非常に短い。そこでこういう場合にその楕円体で表されるような量の測定を行なうと、その主軸に属する値が1に近い確率で得られ、他の主軸に属する値はめったに得られない。

この例の極端な場合は、状態ベクトルがちょうど主軸の一つと同じ方向を向く場合である。この時、この主軸上の影の長さは正確に1であり、他の主軸上の影は真夏の真っ昼間の影のように、ベクトルの足元にかくれてしまって、その長さは0である。こんな場合に、その楕円体で表される量の測定を行なえば、決定的にその主軸に属する値だけが得られて、他の値の得られることは決してない。

物理的な量にはおのおの一つずつの楕円体が属しているのであるが、異なる物理量に属する楕円体は一般に主軸の向きが異なっている。だから状態ベクトルがある一つの量Aのどの主軸かに一致した方向を向いている時、一般には他の量Bのどの主軸とも一致していない。だからAを測ってある数値が確実に得られるような状態でBを測れば、いろいろな値が得られる。すなわち決定論的に結果が決定されない。

しかし特別な場合として、Aの主軸とBの主軸とが一致していることもある。その時は例外であって、Aを測ってある数値が確実に得られると同時に、Bを測ってある値が確実に得られる。

また、逆の極端な場合として、Aのどの主軸の方向に状態ベクトルが向いていても、そのベクトルをBの各主軸に射影してみると、どれもこれも同じ長さの影を投ずる、という場合がある。この時は、Aの測定である値が得られている状態においてBを測定すると、可能なあらゆる値がみな等しい確率で現れる。これは完全な非決定であって、ウェーヴィクルの位置と運動量、あるいは位相と振幅などの対の量はこの関係にある。こういう関係にある一対の量を互いに共役であると名づける。

これ以上ウェーヴィクルに関する描写をつづけることはやめにしよう。読者はこの表象のあまりにも怪奇なことに驚かれたかもしれない。古典的な粒子とか波動とかはなるほどそれとてすでに素朴な粒子、波動そのものでなく、やはり数学的規定を要するものであったにしろ、これらの表象を頭の中に描くのは極めて容易であった。それに反しウェーヴィクルとは何と手数のかかるものだろう。状態がベクトルで表されたり、物理量が楕円体であったり、あまりにも突拍子もない道具立てには驚かずにいられない。そしてベクトルが主軸に投ずる影の長さで確率が計算されるなどということをこの理論は天下り的に納得させようとするが、なぜそうなるかと問いても答えてくれない。しかしどうだろう。大きさがなく色もなく、ただ位置だけある点というもの、それの座標もx、y、z、それを時間変数の関数とみなして微係数というものが存在すること、あるいはまた三角形の辺の比と角度との関係で定義されるsinとかcosとかの関数、そういうものを諸君のような学校で習ったことのない素朴な自然人があったとして、色のない物の運動とか、音の伴わない波動とか、あるいはそれらの概念が実数の集りx、y、zとか、微係数とかいうものを用いて規定され、かつ三角形の辺の比と角度との関係などという突拍子もないものが持出される、この道具立ての怪奇さに果して驚かないだろうか。そして波長の5.83×10^{-5} cmの波が黄色であると天下り的に納得させようとするが、これだけのセンチがなぜ黄色であるかの説明は一つもないといって、この自然人は不満をもらすことだろう。

七

いろいろな物理量がそれぞれテンソルで表されることを述べたが、このいろいろなテンソルはテンソル代数学に従って、加え合せたり、掛け合せたりすることが出来る。こうして基本的ないくつかの物理量の関数によっていろいろ複雑な物理量を定義することが出来る。この場合特に注目すべきことは、テンソル代数学によって、二つのテンソルAとBとを掛け合せるとき積ABと積BAとが一般には等しくないことがある。ABがBAに等しくなるのは、この二つのテンソルを表す楕円体が共通の主軸方向をもっている特別な場合だけである。前に、位置と運動量とか、位相と振幅とかのような互いに共役な二つの量においては、一方の楕円体のどの主軸をとってみても、その主軸の他方の楕円体の主軸の上に投げる影の長さが等しいということを述べた。この場合はある意味で、二つの量の主軸方向がすべて一致しているという上の場合と逆な極端の場合である。こういう場合に、二つの共役量のテンソルをそれぞれA、Bとすると、ABとBAとはもちろん等しくなく、その差が$AB-BA=K/2\pi i$とならなければならぬことが数学的に証明される。ここのKとはある数であって、その値は単なる数学的要求だけからは決定されない。しかしこの上にわれわれは物理的な法則をおいて完全な量子力学的世界像を作り上げてみると、このKとしてプランクの定数hを用うべきことが明らかになる。そうするとすべてのことが実験とよく合うのである。

八

以上の議論はすべてウェーヴィクルとは何かという問に対する答であって、まだこれだけでわれわれの世界像が出来上ったわけではない。ずいぶん長い話をしたけれども、これは前世紀の世界像なら、粒子とは何か、波動とは何か、というほとんど自明のことを説明する段階にすぎない。したがってこれは、前世紀の物理学の本ならば自明のこととして書いてなかった部分である。この上にわれわれの論じなければならないことは、自然界がどんな種類のウェーヴィクルのどんな構造物によって出来ているかということと、それらがどんな法則によって運行しているかということである。

この運行の法則がすなわち量子力学であって、この力学はニュートンやマックスウェルの理論と同様に、いろいろな物理量が時間の連続関数として決定論的に変化する仕方を規定する。ただこれらの古い理論と異なるのは、物理量がテンソルとして表されていて、ただの数でないということだけである。

テンソルの時間的変化ということを幾何学的に述べると、楕円体の変化といってもよい。量子力学の法則によると、いろいろの物理量を表すいろいろな楕円体が無限次元空間の原点を中心にしながらぐるりぐるりと回転するのである。しかもこの回転はいろいろな楕円体が互いにコンフィギュレーションを変えないように斉一に行なわれる。この時、状態を表すベクトルは動かない。

この斉一の回転を決定する方程式を、ニュートン力学にならって、運動方程式という。問題にしているウェーヴィクル系のどの物理量でもよいがそれをAとすると、運動方程式は

$$\frac{dA}{dt}=\frac{2\pi i}{h}(HA-AH)$$

という形をしている。ここに出てくるHなるテンソルは、その問題にしている系の構造によって決定されるもので、どういう種類のウェーヴィクルがどういう力のもとにあるかというようなことに関係する。

ニュートン力学やマックスウェル電気力学でそうであったように、いろいろな物理量は互いに独立でなく、そのうち最も基本的ないくつかの量だけが独立で、あとの量は、それらの関数として与えられる。この基本的な量としてはいく組かの互いに共役な量をとるのが普通である。例えば、質点力学では粒子の座標と運動量とが基本的なもので、他の量、例えばエネルギーとか角運動量とかいうものは座標と運動量との関数であったし、電気力学では、空間のおのおのの場所における四元ポテンシャルとそれに共役な関係にある電場の強さとが基本的なものとしてとられた。量子力学でもこのことは同様であって、ウェーヴィクルの座標と運動量とか、あるいは空間の場所場所のポテンシャルとそれに共役な量とである。そうすると、上の運動方程式に現れたHなる量もご多分にもれず、これら基本的な量の関数として与えられる。この関数の形はわれわれの対象の構造によって定まる。こういうふ

うに、系の構造を与えるものという意味でこのHなる関数は大切な物理量であるが、それのみならず、このHは、上の運動方程式でAのところにHを代入してみればすぐわかるように、時間的に不変な量*である。この時間的に変化しない量をわれわれはその対象のもっているエネルギーと名づける。

* たくさんの楕円体が互いのコンフィギュレーションを変えないで斉一に回転する時、動かない楕円体がありうるということは、空間が複素数的だからである。

こういうふうに、われわれの対象の構造はエネルギー関数の形を決めるし、またエネルギー関数の形を見れば、この対象がどんな構造をしているかがわかる。例えば、座標をQと書き、それに共役な運動量をPと書くとして、

$$H=\frac{P^2}{m}+\frac{k}{2}Q^2$$

なる形でHが与えられると、われわれ物理学者はすぐに、ははあ、これは、質量mのウェーヴィクルが原点から弾性的の力に働かれているのだな、と考える。この構造のものは、ニュートン力学の場合なら、「振動子」と名づけられたもので、この振り子は

$$\nu=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

なる振動数で振動する。われわれのウェーヴィクルの場合も、運動方程式を解いてQやPの楕円体の

時間的変化をしらべると、やはりνという振動数でそれが周期的に変化することがわかる。その意味でこのウェーヴィクル系も振動子と名づけてよい。

量子力学の最初の出発で、プランクはこの種の振動系のエネルギーは$h\nu$おきの飛び飛びの値をとると仮定した。これはニュートン力学では説明の出来ない事柄であったが、われわれのウェーヴィクル力学ではこれが次のような数学の手続きで自然に導かれる。すなわち上のH式の中でPとQとは互いに共役な量であることを注意すると、この二つのものは、$PQ-QP=h/2\pi i$をみたすテンソルである。次にPとQとがこれをみたすものとしてテンソル代数学によって上のHを作ってみて、このHの主軸の長さを決定する。そこで、主軸の長さの逆数を二乗すると、Hを測定したとき現れる可能な値になるというウェーヴィクルの一般論を用いると、実際にエネルギーの測定値は$h\nu$おきに飛び飛びのものだということが出てくる。

九

ウェーヴィクル系が一つ与えられると、最も基本的な共役量の関数としてその系のエネルギーが定まる。この時、用いるべき共役量について、われわれにはある程度選択の自由がある。例えば、古い力学の場合と同様、座標として直交座標x、y、zをとることも出来るし、また極座標r、θ、φを用いることも出来る。そしてx、y、zの代わりにr、θ、φを用いることは単純な数学的な変数変

換にすぎない。しかし、古い理論では粒子と波動とは全く別種のものであったから、粒子に対して用いるべき基本量と、波動に対して用いるべきそれとははっきりと区別がある。すなわち、粒子に対しては、その粒子の位置を決めるべき座標とその共役運動量とを用いることはよいが、空間の場所場所におけるポテンシャルなどというものを用いて粒子を記述することは出来ない。同様に、波動に対しては空間の場所場所における波の高さというポテンシャルを用いるべきで、波動に対して点の位置などというものを連合させることは出来ない。これに応じて粒子には質点力学的法則が、波動には場の法則が成立する。ここで質点力学的法則といったのをややしちめんどうくさく述べると、空間内のいくつかの点に、一定した物理的性質が集中的に存在している場合に、その点が時間とともにどう位置を変えるかという形で与えられた法則である。また場の法則とは空間の各場所場所に物理的性質が分布している場合に、その各場所場所の性質が時間的にどう変るかという形の法則である。古い理論で考えていた電子というものは第一の場合の例である。なぜなら、この場合には空間に一定の電荷が集中的に存在していて、それの位置の時間的変化が問題になるから。また光は第二の場合の典型的な例である。このときは空間の各場所場所に電気力や磁気力が分布していて、問題は各場所場所におけるこれらの力が時間的にどう変るかという点にある。

かように古い理論では、粒子に対して用いるべき基本量と波動に対して用いるべきそれとは全く別であったが、量子論の世界では、粒子と波動と二つの種類のものの代りにウェーヴィクルなるただ一

種のものが活動するのだから、話が別になってくる。すなわち、われわれの用いるべき基本的な共役量についての選択の自由がウェーヴィクルにおいてははるかにひろくなって、例えば電子系の取扱いを場の理論の形でやることも出来れば、光の取扱いを質点力学的に行なうことも不可能でない。そして、電子を取扱うのに、その座標x、y、zを用いる代りに空間の場所場所のポテンシャルを用いることは、x、y、zの代りにr、θ、φを用いるのと同じように単純な数学的変数変換にすぎない。こうして光が電磁場の波動であるということと全く同等な意味で、陰極線は電子場の波動であると考えてよいことになる。電子を質点力学的に取扱うなら、その位置座標x、y、zとその共役量P_x、P_y、P_zというようなものを表す楕円体がどういうふうにぐるぐると回転するかという形で答が得られ、それを場の理論的に取扱うなら、空間の場所場所の「電子場の強さ」とその共役量という楕円体が——この楕円体は空間の各点ごとに考えねばならぬ——どう回転するかという形で解かれてくる。そしてこの二つの答は形式こそ異なれ数学的に全く同等なものである。

古い理論では全く別種のものに対して成立すると考えられていたこの二つの法則、すなわち質点力学的な法則と場の理論的な法則とが、量子力学ではどうして同一の内容を持ち得るかということの大体を理解するには、次のような話をするのがよさそうである。

量子力学においては振動する体系のエネルギーを測定すると、$h\nu$の間隔の飛び飛びの値だけが得られるということを前節の終りに述べた。そこで光の場を考えよう。ただしマックスウェル流のもの

でなくウェーヴィクル的の場を考えなくてはならない。ウェーヴィクル的の場といったのは、古い場と異なって空間の各場所場所にそれぞれの楕円体が属しているということである。そしてこの光の場の方程式を解くと、場の量を表す楕円体が空間の各場所場所で周期的に振動している。そして、もしわれわれが場の量を測定する実験を行なうなら、波のような形の場が得られる。そしてこの「実験値の波」は干渉や回折を実際に示す。この意味で光は波動と考えられてよい。

一方マックスウェルの考えと同様に、空間の場所場所にはエネルギーが分布していると考えられる。ただしここでいう意味は、空間の各場所場所に属してエネルギーの楕円体が存在しているという意味においてである。このエネルギー楕円体は場のポテンシャルとその共役量とでちょうど一三五ページの振り子Hのような形で表される。その結果として、エネルギーを測定してみると、得られる結果は$h\nu$単位で飛び飛びの値となる。これがすなわち光の粒子性といわれた事実に相当する。

こうして、光の波動性とは場の量の測定を行なうような場合に現れ、光の粒子性とはエネルギーの測定の場合に現れることが明らかになる。しかして、場の量の楕円体の主軸とエネルギーの楕円体の主軸とは決して一致した方向をしていないので、この両方を同時に測定するようなことは不可能である。だから、波動性と粒子性とがぶつかり合うことは大丈夫ない。

こうして、ウェーヴィクル的な場を考えると、空間の場所場所には一面に場の量の楕円体が分布しているとみてよいのに、エネルギーの測定値は必ずしもマックスウェルの考えたように連続的に空間

に分布していなくてもよいことになる。すなわち、空間のある場所[*]ではエネルギーは0であり、また他のある場所では $h\nu$ であり、またある場所では $2h\nu$ であるというふうになることが可能である。こうして、プランクの考えは矛盾なく場の考えと溶け合うことが出来る。

* 厳密にいうと、空間のある場所で、どんなに小さくてもよいが有限の体積を考えると、その中に含まれたエネルギーが0であるか $h\nu$ であるか、$2h\nu$ であるか、というようにいわねばならぬ。

光のウェーヴィクル場の理論中に、その粒子性が含まれていることがわかったが、さらに一歩を進めて、このウェーヴィクル場の理論を数学的変形によって質点力学の理論の形に書き直すことも出来るというが、そのみちゆきは次のようなものである。光のエネルギーはある場所では0、ある場所では $h\nu$、また他の場所では $2h\nu$ というふうになることを上に述べた。そこでエネルギー0のところは何もない空虚な場所、エネルギー $h\nu$ のところは光の粒子が一個あるところ、エネルギーが $2h\nu$ のところは光の粒子が二個あるところ、というふうに考えることが出来る。そこで法則を、おのおのの場所場所における場の量やエネルギーがどう変化するかという形で表現する代りに、エネルギーが $h\nu$ であるような場所、いいかえると、光の粒子の存在する位置が時間とともにどう移動するかという形に理論を書き直すのである。エネルギーが $2h\nu$ である場所は、この新しい形式の理論では、二個の光の粒子がぶつかっているところである。

次に光の場合と逆に、もともと質点力学的な形で法則の与えられている電子に対して、その法則を

場の理論の形に書くことも可能である。その時現れる場は電子波の場である。すなわち、空間の場所場所にこの電子波のポテンシャルが分布している。この場においては、空間の場所場所にエネルギーが定義されるばかりでなく、場所場所における電気量が定義される。もし電子場が、マックスウェルが光に対して考えたような旧式のものなら、この電気量は、空間に連続的に分布していることになって、電子の粒子性は、どこにも現れない。しかし場をウェーヴィクル的に考えると、この電気量の測定量は0であるが、そうでなければ $-e$ だけだということが証明される。* これはすなわち電子の粒子性である。こうして場の概念が電子に対しても適用されることになる。ただしここに e とは電気素量といわれる定数で、その値は静電単位で 4.8×10^{-10} である。

* 厳密にいうと、もっと厄介なことをいわねばならないのだが、さしあたり大体のところで我慢してほしい。特に陽電子論では $+e$ も可能になる。

結局場の法則と質点力学の法則とは、同一のものの別な表現法にほかならないことがわかった。すなわち前者は空間の場所場所に眼を固定して、その場所場所での物理的量の時間変化を法則化したものであり、後者は、問題としているある物理的性質が0と異なる場所に注目し、その場所の移動を法則化したものである。このとき、後の見方が可能になるのは、その性質が0と異なれば、それは e とか $-e$ とか一定した値、またはその二倍、三倍等の値のみが可能だという点にある。

話がこうなってみると、この二つの着眼法の間の関係は次の例とあまり違わない。それは電光ニュ

ースといわれる仕掛けである。ぎっしりと配列した電球の着いた板の上に燈が文字の形につけられて移動するあれである。この時、電球の一つ一つに注目してその点滅を法則化すれば、場の法則が得られる。また移動する文字に注目してその運動を法則化したのが質点力学である。ただし、この例は、波動性と粒子性の問題がどう解決されるかの理解には何も手がかりとならない。

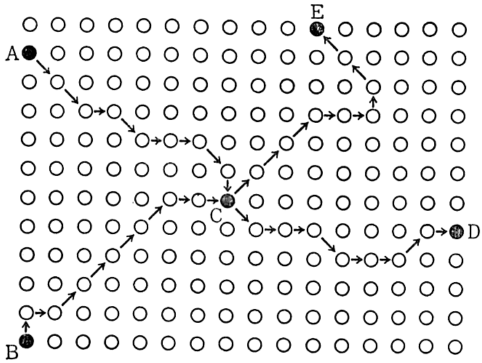
しかしこの電光ニュースの例も、現在の素粒子論において最も重要な議論の一つ、すなわち粒子の統計の問題を理解する助けになるから馬鹿にならない。

十

それは粒子の個性ということである。図のような電光ニュースを想像しよう。AおよびBの電球から始まって $h\nu$ 燭光の燈が順々に点滅して矢にそってCの電球まで移動して行く。このときのC電球は $2h\nu$ 燭光で光って消えた後、燈の点はさらに矢にそってDおよびEのところまで移って行ったとする。これを質点力学的な見方でいうと、$h\nu$ 燭光という性質の質点が二個あって、それぞれAおよびBから矢にそって運動し、Cでその二つの質点が一たん衝突した後、それぞれDおよびEの方向に運動をつづけたということになる。それではDに来た質点はAから来たものであるか、Bから来たものであるか、このような問が意味のないものであることは明らかである。すなわち、もし質点という概念が上のように場の法則から着眼点のちがいだけで現れてくるものなら、この質点のおのおのに太郎

とか次郎とかの名前をつけて、おのおのを他のものから区別することは出来ない。かりに名前をつけておいても、衝突をするたびに、どちらが太郎でどちらが次郎であったのかわからなくなる。

　このことは次のような結果を引き起す。例えば、二つの同じ種類の質点があったとしよう。あるいは厳密にいって、二つの質点法則的な同じ種類のウェーヴィクルといった方がよいかもしれない。その時、各ウェーヴィクルに属する何かの量の測定を行なって、一方のウェーヴィクルの量の測定結果がa_1であり、もう一方の方のそれがa_2であったとする。もしこの質点が常識的なものであるなら、この測定結果には二つの場合が属している。すなわち太郎の測定値がa_1であり、次郎のそれがa_2である場合と、次郎の測定値がa_1であり、太郎のそれがa_2である場合との二つである。しかるにわれわれの質点においては、これはただ一つの場合しか属していない。



電光ニュースの図

　このことは、たくさんの同じ種類の質点の複雑な集りの物理的性質を統計的に取扱うとき重要な事柄である。この種の統計的取扱いにおいては確率論が用いられるが、場合の個数を勘定する仕方がかように常識と異なっているとすれば、その結論もよほど変ったものになってよい。したがって、同種

の質点の集りの統計的性質を実験結果と比べることによって、果して上のような考え方、すなわち質点は個性をもたないという考え方が正しいかどうかを判定することが出来る。実験の結果、実際に光の粒子は個性をもたないものであることが明らかにされた。光の粒子のように個性をもたず、したがって太郎、次郎と呼ぶことの出来ない粒子をボース粒子と呼ぶ。

このように個性をもたないのは光の粒子ばかりでなくて、電子もまた同様である。しかし電子の場合にはさらに特異な事柄が現れる。電子場に対する量子力学的な法則は、空間の場所場所の電気量が0、−eの二つの値だけしかとり得ないこと（2e, 3e, …は起らない）を要求する。[*]これを質点力学的ないい方に翻訳すると、一個より多くの電子が同時に同一の状態にあることは出来ない、といってもよい。そうなると多くの電子の集りの統計的性質は光の場合とさらに異なることになる。このような統計法に従う粒子をフェルミ粒子と呼ぶ。この事実も実験的に裏書きされたことはいうまでもない。

* 前注参照。

十一

こういうようにして、ウェーヴィクル概念を土台にすれば作用量子の存在と場の概念は何らの矛盾もなくひとまず統一されたことになった。そして、量子力学的な法則を質点力学的な形式に表現することも場の理論的な形に表すことも、それは単なる数学的な表現形式の違いだけにすぎない。しかし

理論を相対論的に組上げるには、後の形による方が便利である。この「場」というものは、相対性原理の立場では空間それ自身の属性と考えられ、したがって非常に基本的なものだからである。

場の概念は初め物質的な媒質中に起る物理的現象において成立した。弾性体の中に起る弾性波の場、空気中に現れる音の場などがその例である。それだから昔は電磁気の場も空間にひろがっているエーテルという準物質的な媒体を予想した。ここで準物質的といったのは、普通の物質の存在しないと考えられる真空中にも充満しているという意味で物質的ではないが、エーテルに対して発光体や観測者が運動しているか止っているかが問題となるという意味で物質的である、という意味である。

実際もし光がこういう意味で物質的な媒体エーテル中の波動なら、光の性質は、エーテルに対して動いている観測者と止っている観測者とで異なって見えるだろう。早い話が、エーテルに対して止っている人が測った光の速度と、エーテルに対して動いている人が測ったそれとは異なるにちがいない。実際、音の速度の場合にはこれに相当した事柄のあることはよく知られたことである。

ところが、実験をしてみるとこの予想はみごとにはずれた。光の速度はどんな運動状態にある観測者*からみても不変である。もっと一般に、電磁気現象の法則はどんな運動状態にある観測者からみてもみな同一である。

* ただしここでは等速運動をする観測者だけの範囲に限っておく。

この実験事実から、われわれは準物質的な媒体エーテルを否定せざるを得なくなる。そして電磁気

の場は空間それ自らの中に現れるものだと考えるようになった。そう考えれば、空間は文字通りからっぽであるから、それに対して観測者が動いているとか止っているとかということはもともと意味のないことである。

こういう空間そのものの性質に帰着される場は、音の場とか弾性波の場のような物質媒体に属するものよりも、より基本的な概念である。こういう基本的な場は、その法則がどんな運動状態にある観測者からみても同一であるという特性をもっているはずである。法則が観測者の運動状態に関係しないということを数学的にいうと、その場の方程式がローレンツ変換に対して共変的でなくてはならぬといってもよい。ただしここでローレンツ変換の数学を勉強していただく必要はない。ただ、場の法則が観測者の運動に関係しないということから、その場の方程式が勝手な形をしていてはならないということが要求されるということだけわかっていただけばよい。実際に電磁場の方程式であるマックスウェル方程式はローレンツ変換に対して共変的な性質をもっているのに対し、音の場の方程式はそうなっていない。だから、音の速さは音に向って動いている人からみれば速く、音とともに動いている人からみれば遅く、音速より速く動いている人からみれば、この人は音波をどんどん追い越して行くので、音波は球面波にさえなってくれない。

マックスウェル方程式はローレンツ変換に対して共変的な形をしていたが、逆にこの変換に対して共変的という性質の場の方程式はもっとほかにないであろうか。もしそういうものがあるとすれば、

それらの方程式に従う場が実際に自然界に存在するのではないか。もしこの場をウェーヴィクル的に取扱うなら、それに対してそれぞれ粒子が現れて来ないであろうか。そうすればそれらの粒子は光の粒子と同じように、空間それ自らのおとしだねと考えてよいのだから、非常に基本的なものであろう。電子とか陽子とかいう自然界の最も基本的な構成要素である粒子は、こういうものと考えられないであろうか。

この想像に対してわれわれは「然り」と答える。実際、ローレンツ変換に対して共変的な場の方程式はマックスウェル方程式以外にたくさん存在する。その簡単なものを二、三あげると、クライン・ゴルドン方程式、ディラック方程式、プロカ方程式などというのがある。そして現在、マックスウェル方程式が光に対して成立するということ以外に、ディラック方程式が電子に対して成立するということはもはや疑うことが出来ない。実際にディラックはこの方程式がそれまで実験的によく知られた電子の性質を十分よく説明するのみならず、この方程式の数学的構造からみて、電子と同じ質量でただ電子と異なってプラスの電気を帯びた粒子が当然存在すべきことを理論的に予言した。この正の電子はディラックの予言の二年後に実験的に発見された。ではクライン・ゴルドン方程式やプロカ方程式についてはどうだろうか。ここでわが湯川秀樹博士の中間子理論の話をしなければならない。

十二

原子はその中央に正の電気を帯びた核があって、そのまわりを負の電気を帯びた電子が取りかこんでいるという構造を持っている。このとき電子を原子の内に止めて安定な原子を作らせるのは正の核と負の電子との間の電気的引力である。この電気力はこの原子内に存在する電磁場によって働く。その後さらに実験的研究が進んで、原子核それ自身単純な粒子でなく、複雑な構造をもつことが明らかになった。原子核は陽子という正電気を帯びた粒子と中性子という電気的に中性の粒子とから出来上っている。それではこの二種の粒子を結合して安定な原子核を作らせている力は何であろうか。この力は電気的なものではないだろう。なぜなら中性子は電気を帯びていないからである。そこで湯川博士は電場でない別種の新しい力の場が存在するという大胆な仮説を提案された。そしてまず最も簡単な場の方程式として、クライン・ゴルドン方程式がここで成立していると考えた。

こういう場が実際に存在しているかどうかは、この場をウェーヴィクル場とみなした時現れる粒子が実験的に見出されれば確かめられる。湯川博士は当時実験的に知られていた原子核内の力のいろいろな性質から、もしこの粒子が現れるとすれば、それは正または負の電荷をもったもので、その質量は電子のそれの百倍ないし二百倍程度のものであろうと予言した。この予言の二年の後に、この性質の粒子が宇宙線中に発見されて、中間子と名づけられた。そして湯川理論は急に世界中の注目を引い

た。

その後、核内の力の性質がだんだん詳しく実験的にしらべられるようになると、クライン・ゴルドン方程式の場以外に、プロカ方程式の場が存在するらしく思われるようになった。そうすればまたそれに応じて別の種類の中間子が存在するにちがいない。現在、宇宙線に関する実験の主な中心の一つは、こういう中間子のいろいろな性質をしらべて湯川理論の足場をさらに固めることにあるといってよい。

十三

ローレンツ変換に対して共変的な場の方程式を求め、それをウェーヴィクル的に考えた時現れる粒子の性質をそれから導き出す。この種の粒子を空間自らのおとしだねとして最も基本的なものと考え、これを素粒子と名づける。またこの素粒子に対して実験を行なった時どういう反応を示すかということをしらべる。これが素粒子論の課題である。

素粒子の性質のうちで、場の方程式の性質からただちに導かれるのはそのスピンである。ここで素粒子のスピンという事柄を説明しなければならない。スピンというのは電子において量子力学の成立する前に実験的に発見されたものであるが、それは、電子はただの点電荷でなく固有の角運動量をもっているということである。このことを昔は、電子がある軸のまわりにこまのように自転しているも

のと表象された。スピンの名もこれから来ている。電子がこんな軸をもっているとすれば、電子を記述する座標は、x、y、zの三つの座標のほかに、この軸の方向を決める第四の座標が必要である。

このスピンの本当の意味は、しかし自転などにあるのではない。光の場がベクトル場であったように、一般にローレンツ変換に対して共変的な場の量は、スカラーとは限らずいくつかの成分を有する量である。光の場合に、その場の量がベクトルである結果として、光には波長や振動数のほかに「かたより」という属性が現れる。すなわち光は、横波であって、その振動がどちらの方向に向いているかを決めなくては、光の完全な記述にならない。これに応じて光の粒子も単なる質点でなく、「かたより」という第四の属性を有すると考えねばならない。これはちょうど電子が単なる質点でなくスピンという第四の属性をもっていることと似ている。

実際にこの類推は正しい。電子の場はディラック方程式に従うが、この方程式に現れる場の量はスカラーでなく四つの成分をもった量である。この量は四つの成分をもっているという点で四元ベクトルに似ているが、数学的に「半ベクトル」と名づけられる量である。場の量が四つの成分の半ベクトルであるということから、電子波の状態は波長や振動数のほかにその振動の「方向」を与えねば決定されないことにより、それが電子の第四の属性としてスピンとなって現れるのである。

これに対しクライン・ゴルドン方程式中に現れる場の量は一つの成分だけしかもたないスカラー量

である。この時は、これに属する粒子はスピンなどはもたない単なる質点と考えてよい。またプロカ方程式に従う粒子は電子の倍の大きさのスピンをもっている。マックスウェル方程式に従う光の粒子については、通常は、スピンと別な「かたより」なる属性が考えられたが、これも少し視点を変えて、光の粒子がスピンをもつと考えることも出来る。実際、円偏光の光は、右まわりか左まわりかに従って、その進行方向かまたは逆方向に角運動量をもった光の粒子が飛んでいるのだと考えることも出来る。

電子のスピン角運動量の大きさは、ちょうどプランク定数を 2π で割ったものの半分、すなわち $\frac{1}{2}(h/2\pi)$ である。一般にローレンツ変換に対し共変的な場の方程式をもつ粒子のスピンは $h/2\pi$ の整数倍かあるいは奇数の半分倍であるということが一般的な議論で導き出される。

次にわれわれの理論で導き出される重要な結論は、素粒子のスピンの大きさと統計との関係である。前に粒子にはその統計法の差に従ってボース粒子とフェルミ粒子と二種の別あることを述べた。われわれの一般的な素粒子論によると、スピンが $h/2\pi$ の整数倍の粒子はボース粒子でなくてはならず、スピンが $h/2\pi$ の半奇数倍の粒子はフェルミ粒子でなくてはならぬという結論が出て来る。こうして、中間子は、それがクライン・ゴルドン方程式をみたすものにしろ、プロカ方程式をみたすものにしろ、どちらもボース粒子でなくてはならぬことが予言される。この予言は、まだ十分実験的に確かめられるに至らない。

十四

以上がわれわれの素粒子論の有効な面である。この理論によって、われわれは自然界に現れることの可能な素粒子がどんな性質のものでなくてはならぬかをある程度予言することが出来た。われわれは、可能な素粒子のスピン値を定め、それと統計との間の関係を知ることが出来た。これはこれだけでも注目すべき成果であるけれども、これだけが素粒子について知りたいことの全部ではない。

以上に述べたような、われわれの理論が成功をかち得た分野はほとんど全部、一つの種類の素粒子の単独にもつ性質に関するものである。このほかにいろいろな素粒子は互いに作用を及ぼす。また一つの素粒子は他のものに転換する。実際に電子は光によって作用を受け、光は電子の状態変化の時に発生する。また光は真空の中から正負の電子の対を発生させて自分は消滅する。中間子は自然に崩壊して電子を発生する。こういう現象がたえずわれわれのまわりに起っている。この素粒子界の流転をわれわれの理論は取扱うことが出来るであろうか。

こういう現象を理論の中に組込むには、いろいろの素粒子を含むウェーヴィクル系のエネルギー関数Hの中に適当な項を挿入して、運動方程式を解いた時に、こういう流転が実際現れるようにすればよいであろう。ただしその時挿入すべき項の形として、全体の方程式がローレンツ変換に対して共変的になるようにしておかねばならない。ところが、こういうことをやるとたちまち困難が現れる。そ

れは、そうして得た方程式が数学的にいって解をもたないものになってしまうのである。

方程式が数学的に解をもたないことの現れとして無限大の自己エネルギーというものが出現する。前にも述べたように、運動方程式に現れるHなる量はウェーヴィクル系のエネルギーであった。Hに新しい項を插入する結果として必然的に素粒子が他と何らの作用をもしていない時のエネルギーの上に相互作用のエネルギーが現れて来る。ところが、この相互作用のエネルギーをつけ加えたエネルギーの主軸の長さをしらべてみると、このものはいつも無限大の値をとらねばならぬということになってしまう。一例として、電子場と電磁場とが相互作用をしているものと考える。そうすると、電子が一個だけ存在して光の粒子が一つも存在していないような状態においても、このウェーヴィクル系のエネルギーは無限大でなくてはならぬという結論が出て来る。しかるに相対性原理によれば、エネルギーの存在は必然的に質量となって現れるので、これがもし本当なら、電子は見かけ上無限大の質量をもっていることになる。

電子が一個存在する時、この電磁場との相互作用による無限大エネルギーのよってきたるところをしらべてみると、それは電子が存在すると必ずそのまわりに電磁場が作られ、その電磁場と電子とは必ず相互作用のエネルギーをもつということにある。このエネルギーは電子が自分自身の作る電磁場との相互作用によって現れるものであるから、これを、電子の自己エネルギーと呼ぶのである。この自己エネルギーが無限に大きくなる原因は二つ存在する。一つは電子も電磁場もウェーヴィクルでな

く、電子は単なる粒子であり、電磁場は単なる波動と考えるところの古い理論においても現れたものであって、これは電子を大きさのない点状のものと考える考え方と密接に結びついている。この時電子のまわりには距離に逆比例する電気的ポテンシャルが存在するから、電子が点状であれば、電子のある場所での電気的ポテンシャルは$\frac{1}{0}$の形の無限大である。

第二の原因は、電磁場がウェーヴィクルであることによるものである。電子のまわりに光の粒子は一つも存在しない状態であっても、電磁場がウェーヴィクルである以上、光の粒子に属する波動場が0であるということは出来ない。なぜなら「光の粒子の個数」という量の楕円体と電磁場の強さという量の楕円体とが、その主軸の方向を同一にしていない結果として、光の粒子の個数が0であるという主軸の方向に状態ベクトルが向いている時、電磁場の強さが0であるという主軸と状態ベクトルとは一致していないのである。したがって0と異なる電磁場の強さの主軸が——そういう主軸は無限にたくさんある——その影響を少しずつエネルギーに寄与し、それが累積して無限大を結果する。

こういう面倒な話をここにもち出した理由は、この種の無限大が、プランクの理論の出る前の空洞輻射の場合に現れたそれと似ていることを注意したいからである。すなわちその時の無限大も無限にたくさんあるものからの寄与の累積になったものであった。

場の理論的の見方の方が質点力学的の見方よりもより本質的であると考える相対論的の立場からみるなら、第一の原因、すなわち古い理論でも現れていたといわれたものも、量子論的なものだという

ことも出来る。すなわち点状の電子というものは、電子波の場をウェーヴィクル的に考えなおして初めて現れるものだからである。実際、電子も電磁場も、いずれもウェーヴィクル的でない通常の場と考えれば、何の無限大も現れない。

こういうわけで、いろいろな場の間の相互作用を理論に取入れようと思うと、相対性理論において本質的であった場の概念を、ただウェーヴィクル的に考えなおしただけでは工合が悪いということが明らかになる。すなわち一応の解決を得ていた場の概念と作用量子の概念とが、ここで第二次的の矛盾を示しているのである。それではどういう形でこの解決が得られるであろうか。このことは残念ながら現在誰も確信をもっていうことが出来ない。しかし次の奇妙な事実は何か手がかりを与えないだろうか。

十五

いろいろな素粒子の相互作用の理論は、素粒子単独の性質を規定する理論ほど満足なものでないことは上に述べた通りである。それは、その種の理論がいろいろなところで無限大の結果を与えることからみて、数学的に解をもたない方程式の土台の上に立っていることが明らかになったからである。

ところが奇妙なことに、この数学的に解のないはずの方程式を、数学的には確かに誤っている解き方で解くと、実際と極めてよく合う結果の得られる場合がある。それは光と電子との相互作用の問題

においてである。

この場合、そのトリック的な解法はどういうのかというと、考えているウェーヴィクル系のHの中で、電子と光の場との相互作用を表す項が電子の電荷eという小さい数を含むことに注意する。この数が小さいから、この相互作用は大観してほんの少しの影響しか全体の系に与えないものと考え、まず初めはこの相互作用の項をないものと考えて問題を解く。この段階で電子と光とは互いに独立に存在するのであるから、運動方程式は確かに解くことが出来る。次にこうして得られた結果に、小さなeを含む項の影響による補正を行なう。そうすると、電子によって光が放出されるとか吸収されるとかの現象が現れてくる。次にもっと精密な結果を得ようと思うなら、またその補正に対して二次の補正を行なう。こういうふうに漸近的近似の方法で解を求めて行く。この手続きを光と電子の相互作用の問題に用いて、一次の補正、二次の補正、三次の補正、というように次第に答を精密に出して行なってみると、注意すべき事柄が起ってくる。それはあまり欲を出さずに、一番初めの近似解で止めておけば相当に実験と合う答が得られるのに、欲を出してもう一つ精密にしようと次の補正を求めると、必ずそこに無限大が現れる。こういうわけで、現在の理論は正しいものでないことは明らかなるにかかわらず、完全に精密な答を出してやろうなどという大それた望みを起さずに、第一の補正の程度で満足するという制限をおいてその範囲内で使用するなら相当に役立つ。このことは、われわれの理論も全く見当違いなものではなく幾分の真相を表しているものと考えてよいことを示す。

この幾分の真相ということをもう少し詳しくいうと、われわれの理論は、いろいろな場の間の相互作用が無限に小さいと考えてよい場合には、かつその場合に限り、正しいといってよかろう。なぜなら、こういう場合には、第一の補正以上の補正は高次の無限小となり、したがってもともと計算に入れないでよいものだからである。こういうふうにいってみると、昔、ガリレイ・ニュートン力学とアインシュタイン力学とに関し、また、古い力学と量子力学とに関していわれていたことを思い出す。すなわち、ガリレイ・ニュートン力学はアインシュタイン力学に対して光速度を無限に大とみなしてよい場合には正しいとか、量子力学に対して古い力学はプランク定数を無限に小さいと考えてよい場合には正しい、などといわれたことである。

この事柄は事実そうであるように思われる。というのは、われわれの理論が、電子と光との相互作用の場合のように実際にその相互作用が弱いと考えられる場合には、実験とよく合う結果を与えるにかかわらず、われわれの理論を中間子と陽子や中性子との相互作用の問題に用いてみると、実験といろんな点で喰い違う結果を与える。この場合、これらのものの間の相互作用は、事実、電子と光の場合よりはるかに大きいのである。

いろいろな素粒子の間の相互作用が無限に小さいと考え得る場合に限りわれわれの理論が正しいだろうということは、またわれわれの理論を構成する仕方の中にも現れている。われわれは理論を作るにあたって、まず互いに無関係に他と切り離されて存在する素粒子の理論を作り上げ、その後に運動

方程式のHの中に相互作用を引き起すような項を挿入した。しかし、互いに無関係な素粒子というような概念が意味を持ち得るのは、この相互作用をいくらでも小さくすることが可能であるということを前提とする。

相互作用をいくらでも小さくすることが可能であるということは、果して本当であろうか。われわれの理論では、漸近近似を度を越して用いるといつも無限大が現れるという点からみて、理論の構成の仕方がこのことを要求しているにかかわらず、出来上った理論はその要求をみたしていないことがわかる。すなわちわれわれの理論の結果では相互作用がいくらでも小さく出来るどころか、それはいつも無限大となる。こうしてわれわれの理論は初めの要求を結果が破るという形で、内部に矛盾を含んでいることがわかる。

それでは、自然は一体どちらを望んでいるのであろうか。すなわち、相互作用をいくらでも小さくすることが実際に可能であり、したがって互いに無関係な素粒子という概念が明確な意味をもっていて、その上無限大などの現れて来ない理論が要求されているのであろうか。それとも、相互作用の小ささには限度があり、したがってわれわれの理論の構成の土台になっていた「互いに無関係な素粒子」という概念の変更が要求されているのであろうか。このいずれかが自然界の真相である。しかして量子力学と相対性理論とをそのままの形で結び合せたわれわれの理論は、このどちらにも属せずに内に矛盾を含んでいるのである。この矛盾の所在は多分この理論の中の素粒子とか相互作用とかある

いは時間とか空間とか、そういう概念にあるのだろう。なぜならこれらのものは相対性理論において絶対運動の概念が、量子力学において粒子・波動の概念が受けたような批判を、まだ少しも受けずに多分に日常的な意味で用いられているからである。量子論の形成において、プランクの素量はわれわれに自然を見る見方を非常に変えることを余儀なくさせ、ウェーヴィクルというような新しい概念をわれわれに発見させた。ところがわれわれの理論には、この素量hの他に、電気の素量eが現れる。そしてこの素量の方はhと異なって、まだ全く形式的に理論の中に含まれているだけである。おそらく本当の理論では、このeとか、あるいはまた今の理論に含まれている他の自然定数、例えば電子の質量というようなもの、そういうものの存在が、ちょうどhが古い考え方を捨てることをわれわれに命じたように、われわれに何か考え方の革命を命令するのであろう。

（昭和二十二年十月）

（『基礎科学』第一号、一九四七年、『量子力学的世界像』収録）

素粒子は粒子であるか

一　素粒子は通常の粒子と似たものであるか

すべて物質は原子から出来ている。そしてわれわれが眼に見、手に触れる物質の性質は、これら原子の離合集散、結合の仕方などに帰着されるというのがギリシャ時代から考えられた原子論である。この原子論は物理学のなかに引き継がれ、ほとんどそのままの形で、ただ実験的な実証と数学的な精密化を施されて、前世紀の物理学が出来上ったのである。ところが今世紀にはいって、この原子がさらにいろいろな素粒子から出来ていることがわかった。そこで、すべての物質は電子・陽子・中性子・中間子などの素粒子から組立てられているということになった。ところで、これらの素粒子は普通われわれが粒子と呼ぶもの、すなわち例えば米粒や鉄砲玉のようなものを、ただ小さくしたものと考えていいのだろうか。前述したように、われわれの眼に見え手に触れる、通常の物体のいろいろな

性質、例えば、その色とか、温度とか、あるいは固さ、柔らかさ、とかいうようなものが、これら素粒子の離合集散、結合の仕方などに帰着させられるのであるから、これら素粒子自身が色ももたず、温度ももたず、また固さや、柔らかさ、などという性質ももたないものであることはいうまでもない。少しひねくった言い方をすると、素粒子とは、これこれの色をもつとか、これこれの温度をもつとかいう、文章の主語にはなれないようなものである。しかしそういう色とか温度とかの性質を抜き去れば、後は通常の粒子に似たものと考えていいものであろうか。例えば空間内のどこかに位置を占めているとか、ある速度で運動しているとか、また一つ、二つと数えることが出来るという性質は、米粒や鉄砲玉と同様に、素粒子ももっていると考えていいのであろうか。古い原子論における原子は、実際そういうものと考えられたのである。しかし現在の素粒子論が古い原子論と似た点をもちながら、根本において異なっている点の一つは、素粒子がそんなものではない、ということを覚ったところにある。すなわち素粒子はある点では通常の粒子に似ているが、他の点では全く似ていないのである。

素粒子が通常の粒子に似ている点と似ていない点とを、これからだんだんに述べていこう。

二　素粒子は一つ二つと数えることが出来る

まず素粒子は一つ二つと数えることが出来るという点で、通常の粒子に似ている。実際にわれわれは、素粒子を一つ二つと数える方法をもっている。例えばテレビジョンに用いる螢光板のような装置

は、それに電子がぶつかると光を発する性質をもっている。そこで、この螢光板に非常に稀薄な原子の流れをあてると、板のあちこちの点がポツリポツリと光る。この発光はちょうどその瞬間にその場所に電子がやってきたことを示す。であるからこの実験で螢光板にあたった電子は一つ二つと数えることが出来る。こうして数を数えることが出来るということ、これは電子が通常の粒子と似ている第一の点である。

次に光を考えてみよう。光は通常波動であると考えられている。しかし光も電子と類似してその数を一つ二つと考えることの出来るという性質がある。光がこの性質をもっているということは前世紀の物理学者の全く知らなかったところであって、今世紀の大きな発見である。金属の表面に光（紫外線やX線）をあてると、そこから電子が飛び出すという現象は、前世紀から知られていた。ところが、この時に飛び出る電子について、次のようなことが発見された。充分に弱い（稀薄な）光線を金属面にあてると、この面のあちこちの点からポツリポツリと電子が飛び出す。このとき単色光を用いて実験を行なってみると、飛び出る電子の運動エネルギーは光の強さには関係しない。したがってどんなに稀薄な光線を用いても、このエネルギーが小さくなるということはなくて、そのエネルギーの大きさは、光の色によって定まる一定の値をもっている。このことは光のエネルギーがその色によって定まる一定のかたまりとして電子にぶつかることを意味する。例えば、赤い色の場合には、そのエネルギーは、

0. 0000000000026 エルグ

であり、紫色の場合には、

0. 0000000000052 エルグ

である。この実験で、飛び出した電子を数えることによってその光のエネルギーのかたまりを一つ二つと数えることが出来る。もし、光の干渉とか、回折とかいう実験を知らない人が、この実験だけを行なったとすれば、その人にとって、光とはエネルギーのかたまりの流れであるとしか考えられないであろう。現代の物理学者の考えでは、光線も電子と同様に粒子に似た性質をもった、ある素粒子の流れであると考えられている。この粒子をわれわれは光子（または光電子）と名付ける。結論として光子は一つ二つと数え得るという点で、通常の粒子に似た性質をもっている。

他の素粒子、例えば陽子とか中性子とか、あるいは中間子とかにおいても全く事情は同じである。これらの素粒子は一つ二つとその数を数えることが出来るという点で、粒子と似た性質をもっている。

三　素粒子のおのおのは自己同一性をもっていない

上述のように素粒子は粒子と似た性質をもっているけれども、しかし普通の粒子と全く同じ性質のものではない。すなわち素粒子はその一つ一つが、自己同一性をもっていないという点で粒子と異なったものである。簡単のために、米粒が二つあったとしよう。この時、米粒のおのおのを第一の米粒、

第二の米粒と区別することが出来る。言い換えれば、一方の米粒に、例えば一郎という名前をつけ、他方の米粒に次郎という名前をつけて、それらを互いに区別することが出来る。そして、この米粒をどんなにまぜても、一郎はいつも一郎であり、次郎はいつも次郎である。すなわち、難しくいうとそれぞれの米粒が自己同一性をもっている。この時、おのおのの米粒は互いに似ていても、どこかに違いがあるものであるから、われわれがこの違いによって、一郎と次郎とを見失うことはない。この場合、考えの上では全く同一な姿をもった米粒を考えることも出来る。その時は、双生児の名前を人が時々間違えるように、どちらが一郎で、どちらが二郎であったかわからなくなることもあるであろう。しかし、そういうことがあったにしろ、それはみる人に区別がわからないだけであって、実際には一郎はやはり一郎であり、次郎はやはり次郎である。こういう性質をもっているのが通常の粒子である。こうして通常の粒子は一つ一つが自己同一性をもっている。ところで、今二個の光子をとってみる。この時には事情が異なる。すなわちわれわれは二つの光子の一方が一郎であり、他の一方が次郎であるというふうな区別をすることは、そもそも出来ないのである。素粒子というものは、物質構成の究極要素であり、同種類の素粒子は、どの二つをとっても互いに全く同一な瓜二つの性質をもっている。したがって全く同一の姿をした双生児の場合と同じく、名前をつけても、みる人に全く区別がつかないということが考えられる。しかも二つの素粒子においては、みる人に区別がつかないのみならず、その区別を考えることが、原理的に出来ないのである。難しくいうと素粒子の一つ一つは、自己同一

性をもっていないのである。

このことは実際実験的にも示される。それは素粒子の集まりの示す統計的な性質を調べてみればい い。この種の統計的議論には確率論が用いられる。この確率の計算において、粒子が自己同一性をも つや否やが、異なった答を与えるのである。簡単な例として次のような問題を考えよう。二つの箱 (それをA、Bと名づけよう)のなかに、でたらめに二個の粒子を投げこむ実験を行なったとしよう。 こういう実験を何百回、何千回と繰り返した時、ある時には二つともの粒子が一方の箱、例えばAの なかに投げられるだろうし、他の時には他の一方の箱Bに二つの粒子が入るだろう。しかして第三の 場合にはおのおのの箱に一つずつの粒子が入るだろう。この時、二つの粒子が二つともAの箱に落ち るのは、全体の回数の何分の一であるか。あるいは二つともBの箱に落ちるのは何分の一であるか。 さらに二つの粒子の一つがA、一つがBに落ちるのは全体の何分の一であろうか、ということは確率 論の問題である。これを確率論では次のように計算する。すなわちそれぞれの場合の実現の仕方が幾 通りあるかということを計算し、それをあらゆる場合の実現の仕方の数で割って、おのおのの場合の 確率を計算する。今の簡単な例題においては、二つの粒子を二つともAの箱に入れる仕方は一通りで あること、また二つの粒子の二つともをBの箱に入れる仕方も一通りあること、さらに二つの粒子が 一つずつAとBに入る仕方は二通りあることに注意する。この最後の場合が二通りであるというのは、 一郎をAに入れ、次郎をBに入れるという仕方と、一郎と次郎とを入れかえて、次郎をAに入れ、一

郎をBに入れるという仕方と、合せて二通りの仕方があるからである。こうして二つの粒子を二つの箱に入れるあらゆる仕方の数は、一通りと一通りと二通りを加えて1+1+2すなわち四通りになる。しかして二つの粒子が二つともAに入る仕方は一通りであったから、そういうことの起る確率は1+1+2で1を割ったもの、すなわち1/4。同様に二つの粒子が二つともBに入る確率も1/4、しかして二つの粒子を一つずつAとBに入れる仕方は二通りであったから、その確率は1+1+2で2を割ったもの、すなわち1/2となる。以上の結果から、例えば上述の実験を、一〇〇〇回繰り返せば、そのうち約二五〇回は二つの粒子が二つともAの箱に入るであろうし、また他の約二五〇回は二つの粒子が二つともBの箱に入るであろうし、残った約五〇〇回が二つの粒子が一つずつAとBに入ることになる。実際、このような実験を、例えば通常の米粒を用いて読者自身やってごらんになることもできよう。

ところが、この粒子として、米粒の代りに光子をとってみよう。光子を箱に投げこむというような実験を実際直接に行なうことはできないが、これに相当した、より複雑な事柄は、たくさんの光子の集まりの表わす統計的な性質を実験することによって行なうことが出来る。このような実際の場合は非常に複雑であるから、ここでは仮りにこの簡単な実験を光子について行なったと考え、その時どういう結果が起るであろうかを述べてみよう。結果はこうである――。光子の場合には米粒の場合と異なって全体の1/3、すなわち一〇〇〇回の実験を行なったなら約三三三回は二つの光子が二つともA

の箱に入り、他の$\frac{1}{3}$は二つの光子が二つともＢの箱に入る。しかして、残りの$\frac{1}{3}$の回数が二つの光子が一つずつＡとＢに入るのである。

この結果は何を意味するのであろうか。この事実は二つの光子が二つともＡに入る確率が$\frac{1}{3}$であり、二つの光子が二つともＢに入る確率が$\frac{1}{3}$であり、さらに二つの光子が一つずつＡとＢに入る確率も$\frac{1}{3}$であるということを意味する。米粒の場合には、このおのおのの確率がそれぞれ$\frac{1}{4}$、$\frac{1}{4}$、$\frac{1}{2}$であったのに対し、いまわれわれはそれと異なって$\frac{1}{3}$、$\frac{1}{3}$、$\frac{1}{3}$という結果を得たことになる。それではこの差異は一体どこから起ったのであろうか。

それはこうである。すなわち光子の場合には、二つの粒子の二つともをＡの箱に入れる仕方が一通りあり、二つの粒子の二つともをＢの箱に入れる仕方も一通りある、という点では米粒と同じであるが、最後に二つの粒子を一つずつＡとＢに入れる仕方の数が米粒の場合と異なって一通りしかないということによるのである。この初めの二つの結論は米粒の場合と同一であって問題はないが、最後のもの、すなわち二つの光子を一つずつ、ＡとＢに入れる仕方が一通りしかないということは、米粒の場合と非常に異なっている。

米粒の場合に二つの粒子を一つずつＡとＢとに入れる仕方が二通りあったのは、すなわち一郎をＡに入れ、次郎をＢに入れるという仕方と、一郎と次郎とを入れかえて、次郎をＡに入れ、一郎をＢに入れるという仕方と、二つの可能性があったからである。これとくらべて二つの光子を二つの箱に入

れる仕方が一通りしかないということは、光子に一郎、次郎の名をつけて区別してはいけないということを明らかに示しているわけである。こういうふうに、光子はそれを一つ二つと数えることが出来るという点で米粒に似ているが、その一つ一つの粒子に名前をつけて互いに区別することが出来ないという点で米粒とは異なっている。*

* たくさんの光子の集まりの性質を統計的に論ずるときに、通常の粒子の集まりと異なった計算の仕方をせねばならぬことに初めて気がついたのはインドの物理学者ボースであった。そこでこの計算法をボースの統計法と名づける。粒子が電子であるときには、それが自己同一性を持たないという点から来るもの以外にもう一つ、光子と異なって、二つ以上の電子が同一の状態にあることが出来ないという別の性質に由来して、さらに異なった統計法を用いねばならない。この電子の場合の統計法をフェルミの統計法という。

光子以外の一般の素粒子においても事情は同じである。このとき互いに区別できないということは、単にお互いが瓜二つに似ていて識別が出来ないという意味ではなく、原理的に名前をつけられるような代物でないことを意味する。それではこういう奇妙な性質のものは、一体ありうるのであろうか。

四　自己同一性をもたない「粒子」はあり得ないものではない

答は「然り」である。こういう性質のものの例は、実はわれわれもすでによく知っているのである。もし諸君が東京や大阪などの大都会におられるならば、私は諸君を新聞社の前に案内しよう。そこの

ビルディングの上に電光ニュースという仕掛けがある。それは大きな板の上一面にたくさんの電球をギッシリと取付けた仕掛けである。その上をニュースの文字が電燈の点滅によって右から左に流れていく。この装置を一つ諸君とともにいじらしてもらうことにしよう。

文字のような複雑なものは考えないで、この電球の一つを、例えば百ワットの電流で光らせよう。次にそれを消して、ただちにその隣りの電球を百ワットで点けよう。次にこれを消してまた隣りの電球を百ワットで点けてみよう……こういうことを、次々に行なうと、明るさを変えない百ワットの光点が次々と板の上を動いていく。そのありさまは一定の性質をもった一つの粒子が板の上を動いていくのと全く同じにみえる。同様のことを二つの電球を点火して行なうことが出来る。その時には、二つの光点が板の上を動いていく。こういうふうにして板の上を幾つかの個数の光点を走らせることが出来る。光点は一つあることもあり、二つあることもあるが、その数を一つ二つと数えることは可能である。その意味でこの光点は粒子に似た性質をもっている。二つの光点がだんだんに近づいてきて重なりあう時には、そこの電球を二百ワットで光らせるようにしておこう。そうすれば、それは、その場所に同時に、二つの粒子がやってきたのだと解釈することが出来る。この光点は一つ二つと数えられるという意味で粒子に似ているが、明らかにこの光点のおのおのに名前をつけて区別することは出来ない。

例えば図1のような電光ニュースにおいて、AおよびBの電球から始まって矢で示したように光点

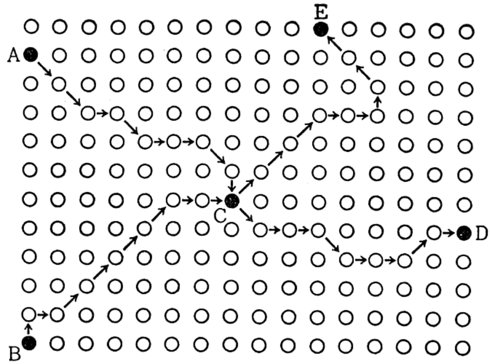


図１　電光ニュースの図

が移動して行ったとしよう。Ａ、Ｂから出発した二つの光点はＣで一度ぶつかり、次に再びわかれてＤおよびＥに行く。さてこの時、それではＤに来た光点はもとＡにあったのがやって来たのであろうか。それともＢにあったのがやって来たものであろうかと問うてみる。ところでこのような質問が何の意味もないものであることは明らかである。したがって、二つの光点が板の上を動いている時に、この二つの粒子のおのおのに名前をつけて区別することは出来ない相談である。

またもう一つの例を考えてみよう。すなわち例えば、ＡとＢの二つの場所が光っていると考える。この時、ＡとＢの二つの場所を光らせる仕方に幾通りあるかを考えてみる。これは明らかに一通りしかない。これに対し、二つの個所ＡとＢとに二つの米粒を置く仕方は二通りである。その理由は、前にも話したように、一つの仕方に対して、その二つの米粒をいれかえたもう一つの仕方があったからである。しかしＡとＢとの二つの個所の電球が点火している時にその光点を入れかえるなどということは出来ない。二つの箱に二つの光子を入れる仕方が一通りしかなかったのはこれと同じ事情である。

光子のように自己同一性がない粒子というものは、この電光ニュースの光点のようなものだと考えれば、その意味において決して存在し得ないものでないということが、これで明らかになった。素粒子というのは、まさにこういうものなのである。それは粒子であるといっても、電光ニュースの上の光の点のような意味のものである。実際、現在の素粒子の理論では、素粒子をこういうものとして取扱う。

素粒子論において、電光板の役目をするものは、いわゆる場である。素粒子とは電光ニュースの上に現れる光点のように、場に起る状態の変化として現れるものである。この状態の変化を支配する法則は場の方程式といわれる数学の形で表される。空間のなかにはいろいろな場が存在していて、そのおのおのの場にはそれぞれ異なった素粒子が現れる。電磁場の現れとしては光子が、ディラック場の現れとしては電子が、さらに湯川場の現れとしては中間子が現れるのである。

五　素粒子が空間のどこの点にいるかということは定められる

以上述べたように、素粒子は通常の粒子とちがったものだが、粒子と似たものでもある。素粒子が粒子に似た点はまだいくらでもある。その一つは、素粒子が空間のどこの点にいるか、ということを定めることである。* したがって素粒子がこれこれの点にいるということがらは意味をもったことがらである。実際にわれわれは素粒子の位置を定める実験をもっている。前に螢光板の実験の話をしたが、

その実験で板の広い範囲が一面に光ることは決してなく、いつでも板のどこかの一点がポツリポツリと光るのである。しかして、板のどこかが光ったということは、その時に、実際、電子がそこにいたことを意味する。このように素粒子は空間内の一点にその位置を定めることが出来るという点で、粒子に似ている。

＊ これはやや精密でない言い方であるが一応ある近似でこう言ってもよい。

六　素粒子のもつ運動量とエネルギーの値は定められる

もう一つ素粒子が粒子と似ているのは、その一つ一つがエネルギーや運動量の担い手になっているということである。実際、例えば紫色の光の光子一個は、

0.0000000000052 エルグ

のエネルギーと

0.00000000000000000000017 g cm/秒

の運動量をもっている。光電効果のときにはこのエネルギーが電子に伝えられるので、これだけのエネルギーをもって電子が飛び出してくる。さらに電子の場合には、一つ一つが電荷

0.00000000048 静電単位

と、質量

0.00000000000000000000000000098 g

をもっている。これらの質量や電荷や、またエネルギーや運動量は不可分のものであって、その半分や1/3の電荷や質量をもった電子とか、その半分のエネルギーの紫の光子などは決してつかまえられたためしはない。この意味で素粒子は不可分の粒子である。

七　素粒子は、その位置と運動量とを二つ一緒には定められない

以上のような点で素粒子は粒子に似ているが、ここに著しく粒子と異なった点がある。素粒子についてその位置を定めることも出来、あるいはその運動量を定めることも出来るにかかわらず、一つの素粒子についてその位置がこれこれであり、かつ運動量がこれこれである、ということは出来ない。すなわち、素粒子とは、粒子と異なって、空間のどこそこにあるという文章と、運動量が何らかの価をもっているという文章とを、「かつ」という言葉で結びつけたような文章の主語になれるような代物ではないのである。簡単にいえば、素粒子とは位置と運動量を同時にもつことの出来ない代物である。前に素粒子は色をもつことが出来ない、したがって素粒子は、その色がこれこれであるという文章の主語にはなれないといったが、ここでは事情が少し複雑になる。なぜなら、素粒子とは、その位置がこれこれであるという文の主語にはなれるし、またその運動量がこれこれであるという文の主語にもなり得るが、この二つの文を「かつ」ということばで結合させた文の頭には来られないようなも

のである、というのである。

八　素粒子は運動の道筋をもつことは出来ない

電子や光子その他の素粒子がその位置と運動量とを同時にもつことができないという事実から結果する一つの結論として、素粒子には運動の道筋をもつという性質がない、ことになる。これは通常の粒子と電子や光子とが全く似ていない点である。このことはまた、電子や光子が電光ニュースの光点とも似ていないことを意味する。実をいうと運動の道筋を性質としてもたないものは素粒子ばかりでなく、複合的な粒子である原子核や原子もそうである。こういうものはわれわれは量子的な粒子ということにしよう。これらのものは運動の道筋をもっていないのであるから、その行動を通常の力学で律することはできない。なぜなら力学とは、まさに運動の道筋に関する理論であったからである。こういう量子的な粒子の行動を律する理論は量子力学と呼ばれる。量子的な粒子については、その位置がしかじかで、かつ運動量がこれこれということが出来ない、といったが、実際にその位置と運動量とを一緒に決める方法をわれわれは知らない。

ここで、読者諸君は必ず次のように考えられることと思う。位置と運動量とを一緒に決める実験方法が存在しなくても、例えば、まず運動量を決め、その後ただちに位置を決めればよいではないかと。しかし、こうして二回の実験で、このものの位置と運動量とが決められるという考えのうしろには、

実験が相手の状態になんの影響も及ぼさないということが仮定されている。前もってその位置を定めて、かくかくの価ということがわかっていても、その後で行なった運動量を定める実験が、せっかく前の実験で得られた位置についてのデータを無駄にするように、相手に影響を与えないとはいわれない。実際に量子的な粒子とはこういう実験による影響をどうしても避けることが出来ないような性質のものである。

量子的な粒子には、運動の道筋をもつという性質がない。このことから常識的にはまことに奇妙な結論が飛び出してくる。例えば次のような一つの実験を考えよう——。

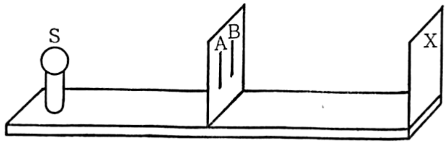


図2

図2に描いたように、電子の源S、二つの穴AとBを穿った壁、およびそのSから出て壁の穴を通過した電子を受ける板X、この三つをもって作った装置を考える。一個の電子がSから出て板Xの上の一点Pにきたとしよう——この時電子が実際Pにきたということは、板Xのところに螢光板をおいたと考えればよい。すなわち螢光板をおいた時、その点Pが光ったということで電子がそこにやってきたことが結論される。この時、電子が道筋をもっているなら、その電子は、例えばS—A—Pのような道を通るか、あるいはS—B—Pのような道を通るかの、どちらかの方法で、SからPにきたといわねばならない。ところがこの実験において、実際、電子については、そういうことがいわれないのである。すなわちこ

のような実験状況のもとでは、電子について、それがAの穴を通ったか、あるいはBの穴を通ったか、のいずれかであるということを断定出来ない。この時には電子は両方の穴を一緒に通ったと考えねば説明のつかない現象が起るからである。

　それは通常、電子の波動性といわれている。すなわち電子はこの時Sから出た一つの波のような振舞いを呈するのである。波であるなら二つの穴の両方を通り抜けてPに達し、ここでいわゆる干渉効果を現すことがよく知られているし、また実際にSのところに電子の源をおく代りに、単色の光源をおくならば、Xの上には光の波の干渉によって規則正しい明暗の縞模様が現れる。このような縞模様は、Aから洩れ出た波と、Bから洩れ出た波とが、その壁の背後の空間で重なりあい、互いに干渉しあって、ある場所では波が強めあい、ある場所では二つの波が打消しあう結果起る現象である。穴が一つしかない時にはもちろんこのような波の重なりあいはないのであるから、決して明暗の縞などは現れない。この縞模様の暗いところは、そこには光が決してこないことを意味する。光が波であると結論されたのは、まさにこの種の干渉の現象からである。

　ところが、電子の場合にも同様なことが起ることが見出された。すなわちSから出た電子がXの上で縞模様の暗いところに相当した位置には決してこないことが知られている。Xのところに螢光板をおくと、あちらこちらがポツリポツリと光るであろうが、縞模様の暗線に相当する個所は決して光らない。この現象から通常の粒子のように、電子においては一方の穴だけしかそれが通らないとは、決

して断定できないことがわかる。なぜなら、もし一方だけを電子が通るなら、それが通らなかった他方の穴の存在は、この電子には縁のないことである。したがってこの穴が、たまたまふさがっていても、その電子の行動には何らの影響もあるまい。そうすれば、一つの穴しか壁になかった時と同じ行動を電子はとるはずである。したがって、その電子は暗線の所へも遠慮なくやってくるであろうから、明暗の縞などは決して現れるはずはなかろう。

前に電子や光子は不可分のものであって、それをつかまえたときには、決して質量や電荷が半分のものとか、エネルギーが$\frac{1}{3}$しかないものなどは、現れないことを述べた。実際、A、Bの窓の板の前に螢光板をおいてここで電子をつかまえてみると、A、B両方にわたって一面に螢光板が光ったり、AとBとの両方が半分ずつの明るさで一緒に光ることなどは決してない。電子や光子はこうした意味で不可分のものであるにもかかわらず、上のような実験状況では（すなわち、窓のところに螢光板などを置かず、したがってそこで電子をつかまえないような状況では）電子や光子はある意味で二つの穴の両方を一緒に通ったと考えねばならぬことになる。これは、はなはだパラドキシカルなことである。

量子的な粒子とはこういう奇妙な性質のものであるから、通常の粒子と決して同じものとは考えられない。しかし、こういうパラドキシカルな性質があるからといって、それは決してこれらの量子的な粒子に対して通常の論理が用いられないということを意味するのではない。われわれが、そのもの

に対して、知らず知らず米粒のようなものを念頭において考えたのが悪いのである。米粒が二つの窓A、Bを通るには、Aを通ってBを通らないか、またはBを通ってAを通らないかのいずれであって、このほかに可能性があろうとは思えないのに、光子や電子はそうでなくて、ある意味で、両方の窓を一緒に通り抜ける可能性を考えねばならない。

九　電子や光子の状態はベクトル的な性質のものである

それでは、この奇妙なものの行動を律するには、どんな法則があるのであろうか。この法則をまとめた一つの体系が量子力学であって、この量子力学では、この奇妙なものの性質が少しの矛盾もなく律せられることが示されている。この量子力学の体系は非常に数学的なものであるが、それは、この種の奇妙なものの行動を律するのには必然的なことである。すなわち電子や光子のように、日常、われわれがみたことのある、通常の粒子と非常に異なったものの行動を述べるには、われわれの日常的な言葉をもってすることができないのは、当然なことである。なぜなら通常の言葉は日常的な考え方と密接に結びついているので、こういう日常的なものとは全く別種の奇妙なものの行動を記述するには、全く不適当だからである。いいかえれば、日常的な考え方から全く自由な、より純粋な言語によらなければ、そういうものの記述は出来ない。こういう、全く自由で純粋な言語というのは、すなわち数学である。量子力学が数学的にならざるを得ない理由はここにある。

この数学的理論をここに述べることは出来ないが、この理論で、いかにして光子や電子などの奇妙な性質を記述することが出来るかの片鱗を、一つ比喩を用いて示しておこう。しかしまずお断りしておかねばならぬことは、これから述べることはあくまで比喩であって、これで、量子力学の全般がつかまえられるものと考えてはならない。

米粒や砂粒は、Aの穴を通るか、Bの穴を通るかのどちらかであって、Aを通ればBを通らないし、Bを通ればAを通らないはずである。これに対し、電子や光子においては、AかBかの一方だけを通るとは限らず、別の通り方、すなわちある意味でAとBとの両方を一緒に通ることが出来るという。この時、光子や電子は不可分なものであるというのであるから、両方を通るという意味を、常識的にこれらのものが二つに分かれて両方を通ると考えるわけにはいかない。さて、二つに割れもせずに一個のものが両方の穴を通るのは、どういうわけで可能であり、どういう意味において可能なのであろうか。

この点についての量子力学の考え方は次のようにいうことが出来る。それは、日常的な考え方では、Aを通るということと、Bを通るということを、いわば同じ次元において並立的に考える。例えば、一つの直線上に、中心から右と左とを考えるように。そう考えれば中心から左でなければ右であり、右でなければ左である。これに対して量子力学的な考え方では、Aを通るということと、Bを通るということとが、いわば異なる次元に対応していると考える。ちょうど、空間内でX軸とY軸が次元を

異にするように。この時には空間内にX軸方向でもなく、またY軸方向でもない、中間の方向がいくらでも存在する。一つの光子が、Aを通ることと、Bを通ることとを、異なる次元において考えれば、このAを通ることと、Bを通ることとの、いずれとも異なった別の通り方が、X軸とも、Y軸とも異なった別の方向が存在するのと、同様な意味で、可能になる。すなわち、Aを通ってBを通らないという可能性は、ここでX軸方向のベクトルに対応させられ、Bを通ってAを通らないという可能性はここでY軸方向のベクトルに対応させられる。しかして、この二つの可能性のほかに、ある意味でA、B両方を通るという可能性は、X軸とY軸との中間の向きをもったベクトルに対応させられ、こうして電子や光子の不可分性と矛盾なく両方を通るという可能性が存在し得ることになるのである。

実際、量子力学においては、電子や光子の状態というものが一つのベクトル空間中のベクトルで表されるものと考える。今の場合には、Aを通るということと、Bを通るということとの二つの可能性だけを問題にとりあげたが、一般に電子や光子が空間のいろいろな点に存在することが出来るのであるから、その可能性に応じて無数の軸をもったベクトル空間を想定する。すなわちわれわれの簡単な例では、Aを通ることに対応してX軸を、Bを通ることに対応してY軸を考え、この二本の直交軸で作られる二次元のベクトル空間を考えたが、実際は電子や光子が空間のあらゆる点に存在する可能性をもっていることに応じて、無限にたくさんの直交軸をもつような、無限に次元数の多いベクトル空間を考えねばならない。そうしてこのベクトル空間の中における任意の方向のベクトルが、その電子

や光子の状態を表すのである。ここでAにあるという可能性に対応した軸を、例えばA軸と名づければ、電子がAにあるという状態とは、そのベクトル空間の中で状態を表すベクトルが、ちょうどA軸の方向にむいていることである。またBにあるということは、そのBに対応するところの、例えば、B軸と名づける方向にその状態ベクトルがむいていることを意味する。またもしA軸とB軸との中間の方向にそのベクトルがむいている時には(あるいはそのベクトルがA方向にもB方向にも成分をもつ時には、といってもよい)、電子や光子はAにあるとも、Bにあるともいわれないで、ある意味において、AとBとの両方に一緒にあるといわれねばならないのである。

この時、空間にある無数の点A、B、C、…に対応して、ベクトル空間内には、A軸、B軸、C軸、……と無数の軸が存在するが、ベクトルがちょうどこの軸のどれかの方向に、例えば、C軸の方向にむいていたとすれば、それは電子がCという場所にあることを意味する。逆にわれわれが、電子の位置を定める実験を行なって、Cという場所にそれを見出せば、その時には、そのベクトルはちょうどC軸の方向にむいていることになるのである。

この時、ベクトルがどの軸の方向にもむいていないことがあり得る(例えば三次元空間でX、Y、Z軸のどれとも一致しない方向のベクトルが考えられるように)。その時には電子は、空間のどこかある場所に存在するということは出来ない。この時その電子はいろいろな場所に一緒に存在すると考えねばならぬ。

前に、電子が運動量のある価をもつことができるといったが、それでは運動量がある決まった価をもっているような状態において、このベクトルはどういう方向をむいているのであろうか。この時には、このベクトルはA軸とも、B軸とも、C軸とも、どんな軸とも一致しないで、かつあらゆる軸に対して中間的な方向にむいている（あるいはあらゆる軸に対して平等に成分をもつ方向に向いているといってもよい）。したがって、この時には電子が空間内のA点にあるとも、B点にあるとも、C点にあるとも、どの点にあるともいうことはできない。これがすなわち、運動量のある価をもち、かつ空間のどこかにあるということが、電子や光子について不可能であったということの意味である。

これで量子力学において電子や光子がどういうものと考えられるかということの片鱗を述べたことになる。もちろんここに述べたことは、量子力学の基本的な考え方のほんの一部分をご覧にいれただけである。しかし以上の話で、こういう素粒子というものが、われわれが日常的に考えている米粒のようなものと非常に異なったものであるということは理解していただけたことと思う。

十　む　す　び

以上述べたところによって、電子や光子やその他の素粒子は米粒のようなものと非常に異なったものであることがわかった。それは自己同一性をもたないという点でむしろ電光ニュースの光点のようなものであることがわかったが、さらにまた運動の道筋を持たないという点で、この光点とも異なっ

たものである。

素粒子は電光ニュースに似ているという点で、それは場の方程式で記述されることになるが、この時の場というものも、古い物理学者の考えた場の考え方をそのままもってくることは出来ない。それでは素粒子の状態をベクトル的に考えるという立場がとられていないからである。

そこでわれわれは、場の考えと、状態ベクトルの考えとを、うまく合せて素粒子の理論を作り上げる。それが現在の素粒子論である。

こうして出来た素粒子論は、素粒子のいろいろな性質、特に日常的な考え方からみてはなはだ奇妙に見えた性質をうまく説明してくれる。そういう意味でこの素粒子論は非常な成功をおさめた。しかし、こうして出来た素粒子論は、いろいろの素粒子の間の関係、相互作用のしかたなどの問題にはまだ満足な答を与えてくれない。そういう点からみて、この素粒子論はまだまだ究極的なものとは考えられない。

現在の素粒子論にまだこういう不満足な点があるということは、一面残念なことであるが、しかし、完全でないということは、他面未来に多くの可能性を蔵していることにもなる。こう考えてわれわれは将来に大きな期待をかけているのである。

（昭和二十四年七月）

（初出未詳、『量子力学的世界像』収録）

エーテル・場・素粒子

一　エーテル

むかしの考えでは、真空とは、すべての物理現象をぬきとられた空間であった。その中で物質原子が動いている、空虚な場所のことであった。十九世紀の物理学では、原子の動いている場所は空虚でなく、そこには、エーテルが充ちていると考えられた。通常の物質をぬきとった、いわゆる真空の中にも、光が伝わり、電磁気力が伝わることからみて、それを伝える媒質として、何ものかがなければならない。エーテルは、その媒質として宇宙全体にわたって充ちているものである。

このエーテルは、物質原子の間をうめている何ものかであって、それ自身、通常の原子から出来ているとは考えられないから、明らかに通常の物質とは別のものである。エーテルと原子との関係は、ちょうど、通常の、目に見える大きさの物体と空気との関係のようなものである。目に見える大きさ

の物体に対して、空気は連続体と見なしてよいように、エーテルは原子に対して連続体のように考えてよい。通常の物体が、空気の中をほとんど抵抗を受けずに動くように、原子はエーテルの中をほとんど抵抗を受けることなく運動し、したがって原子の網目構造である物体は、あたかも空気中のかすみ網のように、エーテルの海の中を自由に動くことができる。

エーテルは、このように通常の物体ではないが、しかしやはり、それは物の一種である。それは空間的なひろがりを持っていて、空間内に位置している。何よりもまず、それは運動することができる。光の伝わるのは、エーテルが波状に振動しうることを意味する。

物の一種としてのエーテルの、物としての性質を、その中に現われる光や電磁気の現象を通じて知ろうということが、十九世紀の物理学の一つの課題であった。

二　力学的世界像

そのとき人びとが指導原理としたのは、通常の流体、あるいは弾性体からの類推であった。エーテルの中を光の波が伝わるのは、空気中を音の波が伝わるのと類似している。電磁気力がエーテルを媒(なかだち)として作用し合うのは、弾性体の中で、弾性的なひずみによって力が伝えられるのに類似している。エーテルを支配する法則は、必ず流体や弾性体を支配する力学法則と類似したものであろう。当時の人びとにとって、これらのことは単なる類推以上のものであった。すべての現象を物の運動に還元し

ようという考えが物理学の指導方針であった。その方針に従えば、光の伝播の法則や電磁気の法則をエーテルの運動学と力学とに還元することが、とりもなおさず物理学の目的とすべきことである。力学的世界像といわれるものがこの考えである。

いろいろな現象を物の運動に還元するという企ては、原子論において大いに成功している。物体を作っているたくさんの原子は目にはみえないが、たえず不規則かつ複雑にからみ合い、衝突し合いながら飛びまわり、あるいは振動しているものである。この原子の不規則、複雑な運動の総合的なあらわれが、すなわち熱現象にほかならない。この複雑な運動のはげしい物体に手をふれれば、われわれは熱く感じる。この運動の静まったとき、物体は冷却する。

しかし、光学や電磁気学をエーテルの力学に還元することは、熱学を原子の力学に還元するほどうまくいかない。

第一に、光の波が音の波と異なって横波であるということから、エーテルは空気や水のような流体でなく、鋼鉄のような弾性的な固体でなければならぬ、という意表外な結論がでてくる。しかも、光の波が、鋼鉄中の弾性波とくらべものにならぬ速い速さで伝わることは、エーテルが、鋼鉄とはくらべものにならないぐらい強じんな弾性体であることを示している。エーテルがこんなに剛い固体であるのに、どうしてその中を原子は自由に通りぬけられるのであろうか、通常の力学でこれを説明することは極めて困難である。

それだけではない、電磁気力の媒体としてエーテルを考えたとき、電気力と磁気力との間の、奇妙な、特徴的な関係を、力学的に説明するには、エーテルに対して極めて複雑な、かつ人為的な機械的構造を想定しなければならない。

三　電磁的世界像

このような困難から、エーテルの力学の進歩は行きなやんだ。その間に、人びとの考えは次第に変っていった。すべての現象を力学に還元することは、何もそれほど固執すべきことであろうか。むしろ逆に、電磁気の法則こそ根源的なものであって、すべての現象は電磁気現象に還元されるべきものではなかろうか。これがすなわち電磁的世界像といわれる考え方である。

それは、電磁気学の進歩によってもたらされた考えである。電磁気力のいろいろな性質が、それの伝播の法則が一組の方程式にまとめられた。それは、そのまま素直に受入れるなら、数学的に極めて簡単な、美しい形をしている。その背後に力学的イメージを求めると、極めて複雑したからくりを必要とするが、それは、かえって事をむつかしくする。だから、その法則をエーテルの力学に還元するなどという努力をやめて、その簡単な法則それ自身を根源的なものと考えて、ここを出発点として何が悪いのであろう。

この簡単な方程式を解くと、電気力の「場」と磁気力の「場」とが、互いに特徴的にからみ合いな

がら振動する、という解が得られる。そして、その振動は、実験的によく知られた光の速度をもって、一つの場所から他の場所へ伝わっていくということがわかる。

そうなると、光の波について、何も、エーテルの運動的な意味での振動を考える必要はない。それは、電磁気力が時間的・空間的な周期的変化をすると考えることで十分である。すなわち光の波とは波状に振動し、伝播する電磁気力の「場」である。光の現象は電磁気現象の一つにすぎない。

こうして、電磁気力の場というものが、直接に、その背後に何ら「もの」の運動などを考えずに、物理学の対象になる。この考え方をまとめて言うと次のようになる。

帯電体の近くの空間は、そのままでは何の変哲もなくみえるけれども、事実は、ある特別な物理的性質を持っていて、一たんそこに他の帯電体をもってくると、それに電気力を働かす、という一種の潜在的能力を持っている、と考える。そして、この潜在的能力を荷うものが、すなわち「場」であって、帯電体に電気力が働くのは、この場のしわざである。場がどういうからくりでその能力を持つか、それは考える必要のないことである。エーテル時代の人びとのように、その能力の背後に何か力学的に運転する機構を考えることは、無用のことである。これが人びとの達した結論である。

このような考えによって、場の状態は、そこに潜在する電磁気力によって端的に表現されるものであって、それ以上のものでも、それ以下のものでもない。場が振動するということは、その潜在能力が振動するということである。あるいは、振動するという言い方が何か物の運動を連想して悪いなら、

潜在能力が周期的に変化する、と全く抽象的に言ってもよい。そして、このことの物理的内容は、そこにもし帯電体をもって来たなら、それは、ゆり動かされるであろう、ということと同じである。

電磁気の法則こそ根源的なものであって、すべての現象は、物体の運動をも含めて、みな電磁気現象に還元されるべきである、という考えは、電磁気現象を運動に還元しようとして、うまくいかなかったことの反動である。この考えは、電子の発見と、電子論の発展とによってまず強められ、そしてやがてその限界を示された。

四　電　子　論

物質原子は、それ以上分割されない要素と考えられていたが、そうでなく、さらに小さな要素からできていて、その単位は電気を荷っている、という十九世紀の終りごろの発見は重大である。そうなると、原子のいろいろな性質、ひいては、それから作られている物質のいろいろな性質は、この電気をおびた小単位の性質のあらわれである。電子論は、ものの性質を、この荷電小粒子、すなわち電子、の性質からすべて説明しようとする理論であって、実際に、この理論によって物質の電気的、光学的性質が、基本的な電磁気の場の法則と、それを補足して電子の性質を規定するいくつかの法則からうまく導き出せることを示した。そして、物質の慣性のような力学的な性質すら、これら電磁気の法則から導き出せることが示された。

電気を荷った粒子、例えば電子があると、その近くの電場は潜在力を持ってくる。したがって、そこに電気を帯びたものをもってくると、それに力が働く。このとき、この力は、その潜在力の源であるその粒子自身にも、ご多分にもれず働くものである。しかし、その粒子が静止している限り（あるいはもっと一般的に、等速運動をしている限り、といった方がよいかもしれない）、粒子のまわりの場の状態は、等方的であり、力は四方八方から同じ強さで粒子に働く。その結果、力は全体としてつり合っていて、粒子はどちらの方向にも、おされも引かれもしない。すなわち、粒子には、全体として何の力も働かないと同じである。ところが、止っている粒子を動かそうとすると、そのときの加速度によって、場の等方性がやぶれ、力のつり合いがやぶれ、粒子は自分のまわりの場から力を受けるようになる。そして、電磁場の理論によれば、この力は、粒子を動かそうとする外因にさからうような方向に働くことが結論される。こうして、荷電粒子は、電磁気的な起源だけからでも、加速度に対する抵抗、すなわち慣性を示すことになる。

この事実は、物質の慣性というような、純粋に力学的な性質も、電磁気的な現象のあらわれとして理解し得るかもしれない、ということを示している。

しかし、電子論は、他方で、あらゆる現象を電磁気現象に還元することの限界をも示した。それは、電子の安定な存在そのものが、純粋な電磁気の法則からは説明されないという事実である。電子のような電気のかたまりが安定に存在するためには、どうしても、何か、電磁気的な起源以外の力があっ

て、その電気を凝集してくれなくては困るというのである。

また物質原子を構成している粒子は電子だけではなく、原子核がある。原子核にはいろいろな質量のもの、いろいろな荷電のものがあるが、そのような複雑なことがらを単純に電磁場の法則一本に帰着させ得るであろうか。

五　運動の準拠としての場

電磁気学をすべての現象の根源におくという試みは、このようにやはり成功しないだろう。しかし、「場」というものが理論の土台においてつとめる役割は否定できないことである。

以上のようにして、物質的なエーテルは、非物質的な「場」によっておきかえられた。場とは、そこに潜在する力以上のものでも、以下のものでもなく、その背後に何ら物質的なものを想定する必要もない。場とは、振動するということばに主語を与えるだけの役をする、と言われたのはこの意味である。

しかし、場にも、まだ一つだけ「もの」に似た性質が盲腸のように残っていて、これが人びとの頭をしばらくの間、混乱させていた。

光は電磁場の波動の伝播である。場の一ヵ所が何らかの原因で振動を始めると、振動は、その場所から他の場所へ伝わっていく。この振動の伝わる速さは、毎秒三十万キロメートルである。

ところで、この毎秒三十万キロという速度は何に対してであるか。それは、場に固着した準拠に対してである。あるいは場に固着して光の伝わるのをみている観測者に対してである。もしも、場に固着しないで、場の中に動いている観測者があれば、その観測者にとって、光の速度は異なってみえるはずである。もしも、光の速さと同じ速さで、光とならんで場の中を走って行く観測者があれば、その観測者にとって、その光は一向にどこにも伝わらなく見えるだろう。したがって、そんな観測者に対しては光速度はゼロである。

この点で、場は振動の主語以上の何ものかである。すなわち、場とは、物がそれに固着しているとか、いないとか、あるいは、物のそれに対する速度がどうであるかとかを論じ得るところの、何ものかである。光が一つの場所から他の場所に伝わる速度というようなものを云々する場合には、場に固着してその二つの場所の位置を定めることが可能でなければならない。いわば、場には、それに固有の方眼があって、それに準拠して、場における物の位置を定め得るのでなければならない。この意味では、空間内に位置をしめている物質エーテルのように、場も空間に鎮座している何ものかである。場に「もの」の性質が残存しているといったのはこのことである。

場には、方眼紙のように、たてよこのすじがあるわけではない。だから、一つの場所が場に固着しているかどうか、いまのここが、一時間前のこと、場の中で同じ箇所であるかどうか、それは直接にはわからない。しかし、光の伝播速度を媒にして、それをしらべることは可能なはずである。もし、

ある観測者が場に固着しているなら、その人の居場所を中心にして、四方八方に出た光は、どの方向にも一様に毎秒三十万キロで伝わるように見えるはずである。もし、その観測者が場の中で動いているなら、その人から見て前に行く光は、うしろに行く光よりも、おそく伝わるように見えるはずである。したがって、光の速度を測ってみる実験を行なえば、場の中での観測者の速度がきめられるはずである。場には、たてよこのすじからできている直接の方眼はなくても、この意味で間接的な方眼を考えることができる。

光の伝播以外に、電磁気現象を通じても、やはり同じことをしらべ得るはずである。そこで十九世紀の人びとはこの種の実験に没頭して、場の中での物の速度をつきとめようとした。

六　時計とものさしの狂い

実験の結果は意表外であった。どんな観測者から見ても、光は、四方八方に同じ速さで、しかも、どの観測者にとっても毎秒三十万キロの速さで伝わるように見える、というのが実験の結果である。それらの観測者は互いに勝手な速さで走っていてよろしい。だから、それらの観測者の、場の中での運動の速さも、互いに異なっているはずである。したがって当然、それらの観測者からみた光の速さは、それぞれ異なってみえるはずであるのに。——したがって、光の見かけ上の速さをくらべ合って、場の中でそれぞれの観測者の速さを決めようという企ては、まんまと失敗である。

同様に、光の伝播以外の電磁気現象を用いる方法も、すべて駄目であった。場の中での観測者の運動のちがいから、当然それらの実験に現われるはずだと期待されていたちがいが、実験には全然あらわれてこない。実験の結果は、あたかも、どの観測者もが場に固着しているかのようである。

十九世紀の人びとは、この奇妙な結果を説明するのに、次のような論法を用いた。光の速度を測るには、時計とものさしとが必要である。ところで、当然異なってみえるはずの光速度が、どんな観測者からみても同じに見えるのは、それぞれの観測者の手にしている時計とものさしとが、それぞれの観測者の運動によって、それだけ狂っていることを示している。この狂いによる、時計やものさしの読みの変化が、ちょうど、光速度の見かけの変化と同じであるので、観測値としては、何らの変化も読みとれないのである。これが彼らの説明である。

このとき、時計といい、ものさしといい、いずれも何らかの物理法則、力の法則、運動の法則、に支配されている体系である。そして、これらの物理法則の奥には、電磁気の法則がひそんでいるものと考えられる。そうすれば、これらの体系が、場の中で動いているとき、その時計の周期が狂い、そのものさしの長さが変化することは、あり得ることである。

光の伝播以外の電磁気現象を用いる実験の失敗も、同様な説明が考えられる。すなわち、このときも、いろいろな計器が、現象と全く並行的に狂って、その結果、計器の読みの上には、現象の変化が現われないのである、と。

この時計やものさしの狂いが、光速の見かけの変化を、ちょうど、かっきりと打消すようになるとは、あまりにもありそうもないことだ、と考えてはならない。もしも、時計やものさしの法則が、電磁気の法則そのものから導き出されるものであるなら、これは、むしろ、あたりまえのことかもしれない。もし事情がそうであるなら、われわれのやっていることは、電磁気現象を尺度として、電磁気現象を測っているのだからである。そうなれば、尺度と現象とが同じ割合で変化して、読みの上に何らのちがいも見られないのは当然なことである。

しかし、前にもいったように、物理現象の基礎は、電磁気の法則だけでは不十分である。例えば、電気のかたまりを電子の形に凝集させるには、何か電磁気的起源でない力を必要とする。また時計やものさしを構成している粒子は電子だけではなくいろいろな原子核からなっていて、それらの性質は電磁場の法則一本で説明できるか疑わしい。であるから、問題は、これら電磁気以外の要素が、何故に、そして、如何にして、そのようにうまく時計を狂わせ、ものさしを変化し、もろもろの計器に変化を与えるか、という点にある。

十九世紀の人びとの、この点に関する考えは次のようなものであった。物質構成のからくりをだんだんに分析し、原子の構造を明らかにし、そこの小世界を支配する法則を発見し、また凝集力の本態、そのよって来るところ、などを明るみに出せば、何故に、時計とものさしとがそのようにうまく狂うかの機構がわかるだろう。

七　相対性理論

この十九世紀末の考えに批判的であったえらい学者が二十世紀のはじめにあらわれた。時計とものさしとが、すべて、運動によって、こんなにうまく狂ってしまって、場の中での観測者の運動を知るすべが全くなくなる理由を、こんなふうに求めるのは、果して正しい行きかたであろうか。場の中での観測者の運動が、このようにして、どんな企てをやっても知ることのできないものだとすると、いったい、そんなものが物理学の対象になるものであろうか。場が直接的な方眼をもっているとは、誰も考えるものがないように、一歩進んで、間接的な方眼も、場はもっていない、と考えるべきではなかろうか。これが、そのえらい学者の考えであった。

言いかえれば、場は全くののっぺらぼうである。それに固着しているとかいないとかいう区別が、全く無意味であるような何ものかである。場は八面れいろうであって、どんな運動者も場に対しては平等であるような、そういうもので場はあるのである。場における運動を知ろうとする企てがすべて失敗した理由は、全く簡単に、もともとないものを求めたからである。その理由を、原子の構造とか、凝集力とか、その他もろもろの、しち面倒なことがらの間に求める必要は全くない。むしろ逆に、これらいろいろの事がらが、場はのっぺらぼうである、という事実によって規制されるべきである。

この考えに従うと、時計やものさしが狂うという言いかたは妥当でない。どの時計とものさしが場

に固着しており、どれが固着していない、という区別は全く無意味であり、互いに運動しているどの観測者をも、場はひいきすることはない。そうすれば、すべての観測者のもつ時計やものさしは、それぞれの立場で、平等に正しいと考えねばならない。ある観測者が自分の時計によって同時に（異なる場所で）起ったと判断した二つの出来事が、他の観測者にとっては、同時に起ったのではないと判断されることもあろうが、それは、どちらも正しい。ある観測者にとって、同じ場所で（異なった時刻に）起ったと考えられる出来事が、他の観測者にとっては別の場所で起った出来事であると判断されることもあろうが、それは、どちらも正しい。このようにして、時間も空間も、相対的な概念であって、すべての観測者に共通する、絶対的な時間や空間は存在しない。絶対的なのは、いろいろな出来事それ自体の、時間と空間を総合した一つの四次元世界での、相互の位置関係である。——それはちょうど、通常の空間の内で、物体の左、右、前、後、というような関係は相対的な意味しかもち得なくて、絶対的なのは、その物体の相互の、三次元的な位置関係であるのと同様である。

このように、場はのっぺらぼうの説は、すなわち、絶対的な時間と空間とをみとめないの説である。こういうわけで、この説は通常、相対性理論とよばれる。

相対性理論では、電磁気の場に起る現象が、どんな運動をしている観測者からみても、同一の法則に従って起らねばならぬということをまず要請する。場が八面れいろうであるとか、のっぺらぼうであるとか、いったのはこのことであって、光の速度が、どんな運動をしている観測者からみても、毎

秒三十万キロであるというのは、その一例である。そのとき、任意の現象を時計やものさしに用いても、この要請にそむくように自然が見えることは決してあり得ないし、また、任意の計器を用い、任意の現象を利用した実験を行なっても、この要請に反するようなことは起らない。それゆえ、任意の計器、任意の現象は、すべて、この要請を破らないような物理法則に従って運行しているはずである。このようにして、電磁気現象以外の、およそ、時計、ものさし、その他の計器として用い得る、あらゆる現象も、それを支配する法則は、すべて、この要請によって規制される。そして、なぜそうであるか、という理由は、それが時間・空間の四次元世界の本性である、というところにあるのであって、それ以外の、原子構造、凝集力、等々にその理由を求めるべきではない。

こうなってくると、電磁場の理論に特有であった、毎秒三十万キロという速度は、単に、光の伝播という一現象に属するものではなく、あらゆる物理法則に関係し、自然の深い根底、時間・空間の本性にからみあっている普遍的な定数だということになる。

相対性理論の発見は二十世紀の物理学の、最も大きな発見の一つである。この発見によって、場からは、「もの」の性質が全く切り取られてしまった。そして、この切断手術の効果は、意表外に大きなものである。それは、その後の物理学の発展がまざまざと示してくれる。

相対性理論は、その要請が自然法則を規制するという点で、法則の法則としての役をつとめる。好都合の場合には、この法則の法則だけから、すでに十分意味のある結論を引出すことができる。光速

度より大きい速度はあり得ない、とか、物体の質量は一定でなく速度とともに増大し、その速度が光速に近づくにつれて、無限に大きくなる、とかいう結論がそれである。さらに、有名な例は、質量すなわちエネルギーである、という結論である。それほど好都合でない場合にも、この法則の法則は、未知の法則を求める場合に、人々に、未知法則のわくを与え、行く手を指示する役目をする。この指示がなかったなら、多くの現象のジャングルの中で、愚かな人間は、どんなに迷わねばならなかったであろう。

八　量子論の発見

場から完全にものの性質がぬきとられると、原子と原子——あるいはもっと近代的には、電子やその他の素粒子——の間の空間は、ふたたび真空になる。ただし、この真空は、単なる空間でなく、そこには潜在する力をひそめている。

ところが、この考えは再び現代に至って変えられねばならなくなった。

以上のような、二十世紀の初めにわれわれの到達した考え方は、一種の二元論である。世界は一方では物質原子、あるいは電子と他の素粒子と、他方では場から成立している。一方は物質的要素であり、他方は非物質的要素であるが、物理学は、とにかく、この二種のものを対象としなければならない。この二元論の一元化は、二十世紀のもう一つの大きな発見、すなわち、量子論の発見と、その完

成とを待たねばならなかった。

それは、波動と粒子の奇妙な合体の発見である。光は、今まで述べたように、電磁気の力の波であると考えられるのに、一方では、粒子の性質を持っているという発見、また、電子は、粒子であると考えられるのに、一方では波動の性質を持っている、という奇妙な事実の発見である。この考え方によると、光の伝播は粒子の流れである、と考えてもよいし、今まで電子という粒子の流れであると考えられてきた、いわゆる電子線（あるいは陰極線）は、波動の伝播であると考えてもよい。考えてよい、だけではない。ある種の現象は、どうしても、光を粒子と考えねば説明されぬし、また、ある種の現象では、どうしても、電子線を波動の伝播と考えねばならぬ。

常識的な考え方では、一つのものが波動であり、同時に粒子であることは不可能である。しかし量子論は、波動でも粒子でもない第三の何ものかであって、それぞれ場合に応じて、波動のように、また、粒子のように、あらわれるもの、そういう新しいものの可能であることを示した。これが、波動と粒子の奇妙な合体、と上にいったものである。

光も電子も、あるいはその他の素粒子も、すべてこの第三のものである。この考えによれば、光は、量子論的に修正された意味で電磁場の波動である、というのと同じ意味で、電子も他の素粒子も、何らかの場の、量子論的に修正された意味での波動である。

九　素粒子の母体としての場

波動が粒子の性質を持ち、また、粒子が波動の性質をも持つことができる、ということの量子論の発見は、光と、他の物質粒子との差別を全く取り去ってしまった。光が場にあらわれる波動現象にすぎないなら、物質粒子も、またそうである。すなわち、物質粒子が、ある場所に存在している、ということは、その場所での、その物質の場（それはその物質特有の、電磁場とは別種の場であるが）が、特殊な、波立った状態になっていることにほかならない。それは、ある場所に光が存在していることは、その場所での電磁場が波立っている、ということの別な言い方であるのと同様である。

この観点からみると、物質の運動とは、次のように解すべきである。物質場というものがあって、それのある箇所が波立った状態にある。やがて、その部分の一方の端で、波がだんだんおさまってくる。それにつれて、他方の端に接した、静かであった部分が、だんだん波立ってくる。このようにして、波立った部分は、次第に、一方から他方へ移動していく。これがすなわち物質の運動である。

これらの議論は、もちろん、あらゆる厳密さをぬきにしての話である。どうしてこの波が粒子の性質を矛盾なく持ち得るか。波を、量子的に修正して考える、とはどんなことか、そういう立入った話は、数学の助けなしで、それに触れることはできない。

しかし、これで、現代の物質観の特徴的な一面は十分につかまれている。すなわち、物質も光も区

別なく、それはそれぞれの場の現われにすぎない。「もの」の性質をすべて除き去られた「場」があって、それのある箇所が特殊の状態を呈している。それが、その箇所に物質が存在している、ということの意味である。物質とは場の状態であり、場は素粒子の母体である。

この新しい立場からみて、いわゆる真空とは何を指すか。物質の存在が場の、ある種の状態であったように、真空もまた、場の一つの状態である。相対性の要請から、物質すなわちエネルギー、という結論が出てくるところからいって、真空とは、場がエネルギーを持っていない状態といってよい。ひらたくいうと、場が最も静まっている状態が、すなわち、真空である。

十　場のいろいろ

物質粒子にはいろいろな種類がある。すなわち、電子の他に、陽子、中性子、あるいは、中間子等である。光も粒子の性質を持っていて、これも、それから除外する根拠はない。われわれは、この光の粒子を光子とよぶ。これらいろいろの種類の粒子は、それぞれの種類の場の現われである。そのうち特に、光子は電磁場の現われである。

これらいろいろの場を支配する法則は、もちろん相対性の要請に従わねばならない。すなわち、これらの場を支配する法則は、いずれも、この要請によって規制されるべきである。その上、それはまた、量子論に従わねばならない。これらの場の法則は、この二重の規制をうけ、その規則から、いろ

いろの素粒子の持つ性質の、かなりの部分が導き出される。例えば、それらの粒子の質量が、その速度とともにどう変るか、とか、それらの粒子は、単なる質点でなく、それ自身ぐるぐる自転していると考えられることなどが結論される。そしてさらに、その自転の角運動量の大きさは、ある単位の整数倍、または整数プラス1/2倍でなければならない、などの重要な性質が、一般的規制だけから導き出される。これらは、いずれも実験事実をよく説明する。

これらの理論は、現在、素粒子論とよばれ、物理の新しい分科をなしている。この分科において対象となるのは、量子論的に修正された場である。このようにして、物理の世界の構成要素は、ただ一つ、量子的な場だけとなった。

しかし、このとき、場としては、いろいろな種類のものを考えねばならない。光の場（電磁場）のほかに、電子の場、陽子の場、中性子の場、中間子の場、など、存在する素粒子の種類ごとに場を考えねばならない。そして、これらもろもろの場が、互いに作用し合って、複雑な現象となって現われる。

こうなってみると、物質粒子と場という形の二元論は、場一元に統一されたけれど、今度は、いろいろな種類の場を考えねばならぬという点で、われわれはふたたび多元論を採用せねばならぬことになった。これがただ一つの何ものかに統一されるかどうか、これは将来の問題である。

十一　素粒子論の現状

そこで、現在の素粒子論の問題は、自然全体が、どれだけの、どんな種類の場から構成されているか、それらが、どんなふうに相互作用を行なうか、ということである。この問題にとりくむのに、相対性理論と量子論とがその土台になる。しかし、このとき種々の困難が現われて、現在われわれはまだ完成した理論を持っていない。

その困難の一つは、場の概念を量子論的に修正するとき現われる。量子論的に場の概念を修正するということは、前に述べたように、場の波動に粒子の性質を与えることである。これを大ざっぱであるがひらたくいうと、場の状態に粒子的な不連続性を与えることである。ところが、その不連続性を与えられると、任意に小さい振幅の波などいうものは考えられない。

その結果、電磁場の例をとると、たとい光の一つもない状態においても、そこに、ゼロでない潜在的電磁気力がひそんでいる、ということになる。そして、これに相当した事実は、あらゆる種類の場に対しても成立する。その結果、真空状態すら非常に複雑な状態になる。場の、最も静まった状態においてすら、いろいろな場の、このひそんでいる部分はゼロでなく、しかもそれらが相互に作用し合って、複雑な様相を呈する。真空以外の場合にはさらに事情は込み入ってくる。例えば、電子が存在すると、そのまわりに、複雑な他の場がひそんでいることになる。いわば、電子はそのまわりに複雑

なきものを着ていると言ってもよい。その結果、われわれの実験にかかる電子の性質は、その複雑なきものの性質も混合してくるので、複雑な理論的計算をへて、はじめて実験の結果を導出することができる。われわれが実際に見る素粒子は、このように複雑なものである。

それだけならまだよい。実際の現状はもっと悪い。というのは、相対性理論と量子論とが現在の理論では、まだしっくりと結びつかないことがわかった。形の上でこれを結びつけることはできたが、そうして得られた基礎方程式は、本当の意味で解の存在しないものであることがわかっている。というのは、その複雑な相互作用の様相を、われわれの持っている理論で計算してみると、いたる所で無限大の答が出てくることである。

本当の意味の解がなくても、ある範囲の問題においては、ある一時しのぎの方法で、上に述べた無限大をうまくおとして、とにかく実験とよく合う解を求めることは可能である。したがって、われわれの現在の理論も、一部の真相はうがったものであることは信じてよい。しかし、それで満足することはもちろんできない。むしろ、本当の意味の素粒子論は、これからである。将来は、無限大などここにも出ない理論が作らねばならない。そして、それは多分、相対性理論や量子論の発見にもくらべられるような大きな発見によって、初めて可能になるであろう。

（『現代自然科学講座』第一一巻、一九五二年、『科学と科学者』収録）

《史劇》 『ファウスト』風

中性子誕生の前夜

原作　ウォルフガング・ギョエテ
演出　“理論物理学研究所”突撃隊



標語：批判するためにではなく　　N. ボーア

訳者口上

この戯作「史劇ファウスト」は、ボーア原子模型の五〇年記念の催しのとき、余興として参加者に配られたものである。参加者の一人であった有山兼孝氏が訳者にこれを見せて下さったので、拝借して訳してみた。作の構想は、パウリと中性子（現在の用語では中性微子）をめぐる話を中心に、他のいろいろな插話をも織りまぜて、ゲーテの『ファウスト』をもじったものであるが、『ファウスト』中の主の役をボーアに、**ファウスト**の役をエーレンフェスト、そして**メフィスト**の役をパウリにやらせ、また中性微子を**グレートヘン**に人格化させようというのである。みずから量子力学の創造という大事業をなし、かつその温かい包容力によって多くの人びとを導いたボーア、文字どおり命をかけ、あらゆることをとことんまで究めようとして劇的な生涯を終ったエーレンフェスト、時には人を挫折させたほど辛辣、かつ否定的な批判家で、しかもみずから善をなしたパウリ、こうみてくると、この配役は一〇〇パーセント適切だとは言えないにしても、おおよそ人びとの首肯するところであろう（パウリの性格、彼と中性微子との関係については、『自然』一九六三年十一、十二月号所載、高林武彦氏の文を参照されたい）。

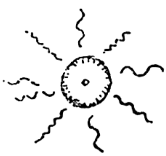
なお、この戯作中『ファウスト』を原作のまま用いている個所については、相良守峯氏のお許しを得て、岩波文庫から同氏の訳を借用させていただいた。ここに氏に対し感謝の意を表したい。插話の部分については、二、三ヵ所もっと調査する必要を感じたが、時間もないので想像をたくましくしたり、ごまかしたりしてかたづけた。また原作をそのまま用いてある所でも、その文意の二重性を利用してうまくふざけている所もあるようだが、それを適当に表わすことはとても訳者の力の及ぶところではないので、あきらめることにした。とにかく私の語学力の不足から珍妙な誤りもあるであろうが、これらの点については、それもご愛敬と考えていただければ幸いである。

天国と地獄の間の序曲

(三人の主天使、主、天使の群)

エディントン教授

ポリトロープなす球の煌(きら)めきにまじって、
太陽は知られたる様(さま)に輝き、
その定めの旅路は、
わが公式すべての正しきことを示す。
それを見ればルメートルは力づく、
誰ひとりそれを究め明かすことはできないが。
不可思議なる貴いみ業(わざ)は、





天地開闢（かいびゃく）の日と同じく荘厳である。

ジーンズ教授

そして速く、思議を絶した速さで、
華やかな二重星はみずから回転する。
巨星の明るさと、
食のたびの夜とが交替（こうたい）する。
非圧縮性の流体は
梨の果（み）の形に分裂し、
そして原子は変化することを好まぬので、
この規範の何ものをも変えることはない。

ミルン教授

そして嵐は月刊報告（マンスリーノーティセス）を、
相競（あいきそ）うてますます一杯にし、
たけり狂って己（おの）がまわりに、
凄絶なる作用の連鎖を形づくる。





時に星の核は縮退(しゅくたい)して、
一〇の一三乗度の高温で焔は燃えあがり、
そして、あのフェルミの昔からの流儀で、
自由自在な空想をかけめぐらさせる。

三人（和して）
それを見ればわれらすべては力づく、
誰ひとりそれを究め明かすことはできないが。
なべておん身の貴いみ業は、
天地開闢の日と同じく荘厳である。

メフィストーフェレス（飛び出して）
これは旦那さま、またお出ましになって、
私どもの様子をおたずね下さいます。
それにいつも欣(よろこ)んで私などにもお会い下さるので、
こうして（観客の方を指さしながら）お召使の衆にまじって罷(まか)り出ました。
星や世界について言うほどのことは何も知りませんが、



私の眼につくのは、ただ人間どもが無暗に苦しんでいるってことです。
そして理論はどいつもこいつもたわごとです、
それなのに、あなたはいつも恍惚として、
もはや救いのないものを宥めたり賺したりしていられる。
そして掃溜でも見つけると、すぐに鼻を突込むんです。

主

わしに言うことは、それだけなのか。
いつもただ不服を訴えにくるだけなのか。
物理に何一つ気に入るものはないのか。

メフィストーフェレス

気に入りませんなあ、馬鹿馬鹿しい、相も変らず困ったもんです。
そいつは、私のみじめな生活の中でも私に厄介をかける、
私は物理屋たちをもっと苦しめてやらねばなりません。

主

言わねばならぬ……言わねばならぬ……



お前はあのエーレンフェストを知っているか……

メフィストーフェレス
あの田舎教師の？

（エーレンフェストのかたち現わる。）



主
わしのしもべだ。

メフィストーフェレス
さあ何をお賭けになります。もし旦那さまが、
あの上分別の男を誘惑してよいとお許しくださるなら、
あれを旦那さまから奪いとってごらんに入れますが……

主
おおソレハ恐ロシイコトダ。ソウイウ事態デハ、
古典的ナ概念ガ本質的ニ破レルコトヲ思イ起サネバナラヌ……
言わねばならぬ……チョット一言所見ヲ……
お前は質量をどうしようというのか。

メフィストーフェレス
どうして？　質量を？　そんなものは捨ててしまうのでさ。

主
それは、非常に、非常に、興味がある……
しかし……しかし……

メフィストーフェレス

そうじゃない、だまってください。やめてください、馬鹿馬鹿しい。

主

しかし、しかし……

メフィストーフェレス

おだまりください。

主

しかしパウリよ、パウリよ、われら二人は、お前が思っているよりも、むしろ一致しているのだ。ワシハモチロンオ前ト全ク同意見ダ、タダ……もちろん質量を捨ててしまうことはできる。しかし、電荷はそうはいかぬ……

メフィストーフェレス

どうして、なぜ。いやいや、それは気分の問題でさ。なぜ電荷を捨ててはいけないというのです。

主

それでは尋ねるが……お前のいうことはみんなわかるのだが……シカシ……シカシ……

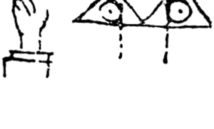
メフィストーフェレス
おだまりなさい。

主
しかしパウリよ。お前はわしに仕舞まで言わせねばならぬ。
質量と電荷と両方とも捨ててしまったら、
あとに一体何が残るのか。

メフィストーフェレス
ああ、そんなことは全く簡単です。何が残るかって、中性子です。
（間。二人、あちこちと歩む。）

主
批判するためにではなく、学ぶために、
今のところ、しばらく引きさがろう。
（退場）

メフィストーフェレス
時々、あのおやじに会うのは悪くないて。



だからおれは仲違(なかたが)いしないように、気をつけている。
パウリを相手に、あれほど人間らしく口をきいてくれるとは、
しかし大旦那として感心なものだ。
(退場)



第一部

ファウストの書斎

ファウスト

ああ、これでおれは原子価論も、
電気力学も、群論ペストも、
また要らんことに変換論までも、
容易ならぬ苦労をして、どん底まで研究してみた。
それなのにこの通りだ、可哀そうにおれという小男が。
昔よりちっとも利口になっていないじゃないか。
マギステルだの、プロフェッソルとさえ名のって、



もうかれこれ三十年ばかりのあいだ、
学生の鼻づらをひっ摑まえて、
上げたり下げたり斜めに横に引回してはいるが――
それはおれだって、やれドクトルだ、マギステルだ、
学者だ坊主だというような己惚れた連中よりはましであろう。
おれはあらゆる懐疑や疑念に悩まされる、
そしてパウリや悪魔も恐ろしい――
それでも黒板に書いてあることを、
おれは知っていなければならぬから、
人様から黒板拭きをうばいとる。
なにしろ、黒地に白い字で書いてあるものがあれば、
安心してそれを家へ持ってかえることができるではないか。
そして人間を良い方にみちびいて誤りを正させるように、
何かは教えることができるのではないかと己惚れてもみる。
しかしおれは財産も金も持っていない。

これ以上こんな風に生きてゆくことは犬だっていやだろう。
そこでおれは人の仕事の批判に専念してみた。
（メフィストーフェレス、がたがた音をたてながら、商用旅行者の装(よそお)いして現われる。）
何をしようというのだ、その音は。

メフィストーフェレス

何かお求めの品物は。

ファウスト

お求めの品物だと。私は君のお客なのかね。

メフィストーフェレス

先生は、今まであまりにも受け身でしたな……
そうです、近ごろは理論もうまくいきません、
だから、先生に一つ新製品をさしあげようと思うのです。
これを使えば必ず世界中うまくいきますよ。
どんなものか、わかったような気にでもなっていただくために、ごらん下さい、
「金の子牛をめぐるおどり」の絵、輻射(ふくしゃ)の理論を。



輪唱　（一同合唱）

ボルン・ハイゼンベルク
ハイゼンベルク・パウリ
パウリ・ヨルダン
ヨルダン・ウィグナー
ウィグナー・ヴァイスコップフ
ヴァイスコップフ・ボルン
ボルン・ハイゼンベルク
……　……
……　……
……　……

メフィストーフェレス

これは私のところの
小さい奴らなんです。
おききなさい、なんと利口に、



快楽や事業をあなたにお勧めしているか。
ほら、スペクトル線の幅は発散しています、
もろもろの波動全体に。
（司会者抗議し、メフィストーフェレスくりかえす。）
ほら、スペクトル線の幅は発散しています、
もろもろの波動場の破れたところで。

ファウスト

もうよい、もうよい。私はそんなものに唆かされはしない。
そんなものの別刷には、金輪際手をふれないぞ。

メフィストーフェレス

そう伺うと嬉しいですな。ともかく物がわかっている。
分別ある老人に会うのは先生が初めてです。
（彼の商品をさし出しながら）
一つ、プシープシーシュテルンは。

ファウスト

気に入らぬ。

メフィスーフェレトス　プシープシーゲルラッハは。

ファウスト　気に入らぬ。

メフィストーフェレス　電気力学は……

ファウスト　気に入らぬ。

メフィストーフェレス　ハイゼンベルク・パウリのは……

ファウスト　気に入らぬ。

メフィストーフェレス　無限大の自己エネルギーの。



ファウスト

気に入らぬ。

メフィストーフェレス

電気力学は……

ファウスト

気に入らぬ。

メフィストーフェレス

ディラックのは。

ファウスト

気に入らぬ。

メフィストーフェレス

無限大の自己エネルギー。

ファウスト

古くさい話だ。

メフィストーフェレス



そこで特製品を見せねばならぬ仕儀になろうて。

ファウスト

何を見せたって、決して私は唆かされないだろう。
どんな理論に対しても、私はいつも言うのだ、
留まれ、お前はいかにも美しいと、
それで、君は私を縛りあげてもよい、
もう私はよろこんで滅びよう。

メフィストーフェレス

理性だの、学問だのという
人間最高の力を軽蔑するがいい。
どのみちお前は妖術や魔法の道で
お前の量子的精神を堅めることになるのだ。
注目せよ、今や困難がいかにして消え去るかを、
そうすれば、お前は中性子の驚異を見出すであろう。

グレートヘン（登場して歌う）

（シューベルト作「グレートヘンの紡ぎ歌」の旋律にて）



わが電荷、　消え去りて、
統計も、　いと難（かた）し、
たずぬとも、　わが電荷、
とことわに、　かえり来じ。



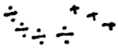
わが身世に、　あらざれば、
なりたたず、　なべての式、
ひろき世を、　ひとびとは、
にがくこそ、　おぼゆらめ。



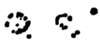
ただわれと、　ともにのみ、
ベータ線、　うまるるを、
窒素核、　なれもまた、







われなしに、在(あ)りは得じ。
わが電荷、消え去りて、
統計も、いと難し、
たずぬとも、わが電荷、
とことわに、かえり来じ。



わが双極、ひたすらに、
かのきみに、したいよる、
かのきみを、かきいだき、
わがもとに、とめおきて。



わがむねの、ときめくよ、
わがスピン、ふるえつつ、
いとし君、いずくにか、

われをば、　つれゆきたまえ。

わが電荷、　消え去りて、
統計も、　いと難し、
たずぬとも、　わが電荷、
とことわに、　かえり来じ。

アン・アーバー夫人の酒類密売店

（またの名、アウエルバッハの酒場ともいう）

（アメリカの物理屋たち、陰気な姿でバーに座す。）

メフィストーフェレス（バーの後方にとび出る。）
おい誰も飲まんのか。笑わんのか。
物理のしかたを教えてやるぞ。
いつもパッパッパッと燃えるくせに、



今日はみんな、湿った藁みたいだぞ。

オッペンハイマー

ヒュム、ヒュム、それはお前のせいだよ。
何もやらかさないじゃないか、お前こそ、
新しいことも、珍奇なことも。

メフィストーフェレス（グレートヘンを出現させ）

そうら、両方ともみせてやる。さあ。

（生き生きした喝采と騒ぎ）

トルマン

お前は今日パサデナをたったんだろう。
そこでアインシュタインと話したか。

メフィストーフェレス

ああ、あの仁なら、言うこと一杯もってらあ。
多分講義にやってくるぜ。





トルマン
何ならそれを聞かせろよ。

グレートヘン（歌う）

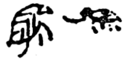
むかしむかし王様が、
大きな蚤を飼っていた。
重力同様目をかけて、
ひと方ならぬご寵愛。
ひと方ならぬご寵愛。





王様マイエルよび出すと、
マイエルすぐにまかり出て、
その若様の身に合わせ、
曲率テンソルの尺をとる、
場のテンソルの尺をとる。





不変形式に仕あがった、
その若様とつれ立って、
王様勇んで旅に出た。
みんな若様ほめたたえ、
みんな若様ほめたたえ。

その若様も年をとり、
むすこが一人できまして、
その子はおやじを追いだした。
けれどもあんまりうまくない、
やっぱり一向うまくない。

ここはベルリン学士院、
蚤から蚤と子が生まれ、
物理屋たちはその蚤を、



「場の新理論」と申します、
「場の新理論」と申します。



一同（歌う）
素敵滅法（すてきめっぽう）いい気持、
五百の豚の幸福だ。

ファウスト（禁酒主義者として知られている。登場）
（メフィストーフェレスに向って）
君は、私がこんな物狂わしいどさくさの中で、
気持がすこやかになると思っているのか。
（グレートヘンに向って）
おれが分らんのか、骸骨（がいこつ）め、案山子（かかし）め。



お前のご主人を、親方を、見それたのか。
なんの遠慮をするものか、こうして叩きこわしてやる。
お前の電子の糊を打ちこわしてやる。

グレートヘン
エーレンフェストさん、わたし、あなたがこわいわ。

（退場）



第二部

風趣ある土地

(ファウスト、花咲く野に横たわる。大いなる音響、ミリカン－アーリエルの近づきくるのを知らせる。)

ミリカン－アーリエル(高きところより)

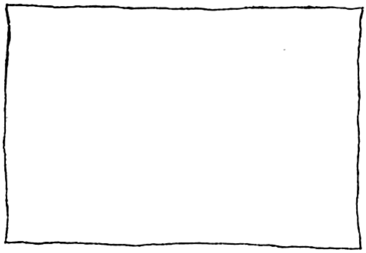
聞け、聞け、愚かなるものたちの言葉を、
霧箱よ、計数管よ。
妖精の耳に、轟く音きこえて、
硅素は生まれた。



陽子らは、きしめき動き、
電子らは、轣轆（れきろく）として進み、
ざわめきつつ光は放たれる。
ロッシは目（め）ばたきし、ホフマンはおどろき、
ハイゼンベルクは不機嫌になる、
耳に余る響きは人々に聞こえぬのだ。

ファウスト（目ざめつつ）
ああ、おれはどこに横たわっているのだ？
どうして、おれはこの土地を知ったのだ？
薔薇の野（ローゼンフェルト）の祝福の中で、
槲（アイヒェ）は不易（インヴァリアント）に緑である。
（司会者に向って）
今日は何があるのか？
（司会者、先ず古典的、次に量子論的ワルプルギスの夜が上演されることを説明し、ファウスト了承する。司会者、古典的ワルプルギスの夜の開幕を報ずる。）





（ファウスト、期待にみちながら身を起す。何事も起らず。ファウスト、司会者に向い抗議する。司会者、なお注意して様子をうかがうようファウストを力づける。再び何事も起らず、司会者、ワルプルギスの夜の古典的な場合には、それが何らの反作用をも観衆に与えぬことが起り得る、と説明する。司会者の問に答えて、ディラックこの見解を支持する。ファウスト、直ちに量子論的ワルプルギスの夜にうつることを提案する。司会者、それに反対し、古典的ワルプルギスの夜を先に上演すべきことを固執する。ファウスト、両ワルプルギスの夜に対して異なった時間パラメターを導入すべしと提案する。ディラック、この見解は「許シ得ナイ」むね説明する。ファウスト、古典的ワルプルギスの夜を、観衆のそれへの作用によって遠ざけることを提案、提案採用される。）

量子論的ワルプルギスの夜

（司会者、舞台のあちこちにあるディラックの孔を指し示し、人々に足もとの注意をうながす。そして、それらに危険標識をたてる。）

単極子（登場、歌う）





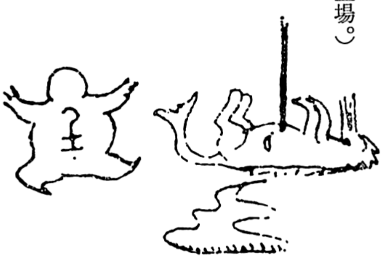


二つ単極子ありました。
二人は愛し合いました。
けれども一緒になれません。
ディラックがあまりに深遠で。

（単極子、司会者に相手極子の行方を尋ねる。司会者、時期を待つよういう。）

（スレーター、血にまみれた槍を持ち、群論竜をば引きずりつつ登場。）

司会者（それに向い）
人々は何を突さしているのだ、転がっているのは何だ。
うめきつつ亡んだのは群論竜か。
そうだ、それは止めをさされて、
われらはそれから解き放たれた。
添字の鱗を一ぱいつけた怪獣、
それは反対称のために亡びたのだ。



すべての獣格をはぎとられて、
それははだかで転がっている。
そうだ、それは止めをさされて、われらはそれから解き放たれた。

いつわりの符号（登場）

理論は消え去り、試みもむだだわ、
符号のたくらみは永久になくならないのよ、
計算はすばらしく精緻を極めても、いつわりの符号は、鍵穴から忍びこむわ。

（「一次元の場合」（ディラック）と「三次元の場合」（ダーウィン）舞台前に現われる。いつわりの符号、前者の周囲を遊動しつつ、それを舞台脇につれ去っていく。後者に対しては、いつわりの符号、近よるすべもない。なぜなら、それは未だ夢のような願望にすぎないと考えられたから。）

（一つの "Q" （ファウラー）登場し、それとの交換関係

$$PQ-QP=h/2\pi i$$









を実演するために「三次元の場合」（ダーウィン）は一つの"P"に変容し、そして、"P"は蛙とびによって"Q"を跳び越え、かくてこれを繰りかえす。その度ごとに $1/2\pi i$ が飛び出してくる。歌。）

P と Q とが入れかわる。
何度も何度も入れかわる
そうしてその度、その度に
$1/2\pi i$, $1/2\pi i$ が生まれ出る。

消え去るまではいつまでも
この蛙とび止まらない、
そうしてその度、その度に、
$1/2\pi i$, $1/2\pi i$ が生まれ出る。

（"P"と"Q"との二つは驢馬電子へと痛ましき変容をなし、不注意によってディラックの孔に落込んでしまう。）



（代って、光子のスピン、インド風の装いして現われ、軽快なる楽の伴奏とともに舞台上方を霊のごとくにさまよう。）

（ディラック登場、四人の灰色の女、それにつづく。）

第一の女

私の名はアイヒ・インヴァリアンテというの。

第二の女

私の名は微細構造常数よ。

第三の女

私のエネルギーは負なのよ。

第四の女

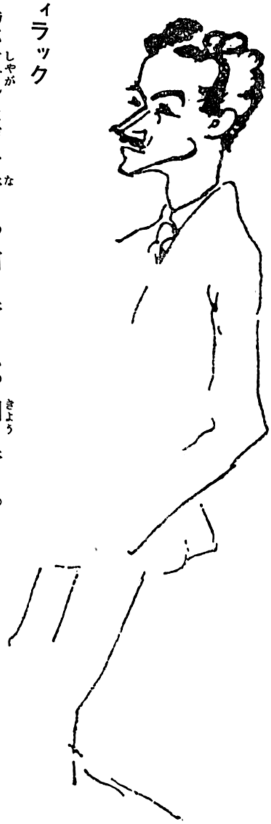
私には特異性が一ぱいなの。
あなたがた、皆さんは、はいれないし、はいってもいけない。
しかし、私はおしまいにきっと現われるわ。
だって、私は計算の途中で紛（まぎ）れ込んでやるの。

（後でまたちょっかいを出すために舞台脇へ去る。）



ファウスト

おれは四人くるのを見たが、帰ったのは一人だ。
話の意味はわからなかった。
今ではこういう妖魔が空中に充満していて、
どうしてそれを避けたらよいのかわからない。



ディラック

鳥が嗄れた声で啼く。何と啼くか。凶と啼く。
われらは二六年まで戻って出なおさねばならぬ。
なぜといって、その後に生じきた一切のものは、
滅びるだけの値打のものだから。

ファウスト

それくらいなら一層のこと、生じない方がよかったようだ。

ディラック（第四の女に）

特異性よ、行ってしまえ。消えてしまえ。

第四の女

来るべきところに来ているのです。

ディラック

よし、おれの魔術で追い出して見せるぞ。

第四の女

自己場の中に私はいないの、
それでも輻射は私を含むのよ。
私はいろいろに姿を変えて
恐ろしい力をふるいます。
軌道の脇でも波動の上でも
永久に心の許せない道連れで、



捜されないのにいつも見つかる、
計算も駄目で、呪われながら。

ディラック
オレニハオ前ノ意味ガワカラヌ。
（退場、特異性にあとを追われながら。ディラック、その長い脚にて逃げおうせたかどうか不明である。）
（メフィストーフェレス現わる。戸をたたくものがある。一人の親切げなる報道関係者、何か尋ねようとするそぶりで中をのぞく。）



メフィストーフェレス
はいれ、はいれ、こっちだ、こっちだ。
ひょろつき腰の報道屋さん、



乾板だ、フィルムだ、そして例の騒ぎだ。

君が来ないと、奴さんは乾からびてしまうよ。

ファウスト（最高に恍惚として、新聞写真のために様子ぶってポーズをとる。）

おれは瞬間に向ってこう呼びかけたい。
留まれ、お前はいかにも美しいと。
この世におけるおれの生涯の痕跡は
これで新聞の中に残るのだ。
このような高い幸福を予感しながら、
おれはいま最高の瞬間を味わうのだ。

（死ぬ。そして新聞記者たちに運び去られる。）

メフィストーフェレス（それに向って）

どんな享楽にも飽くことなく、どんな幸福にも満足せず。
移り変る姿を、ひたすらに追い求め、
その手ごわく逆らうやつを、
可哀そうにも奴さんは、しっかり摑まえようと願った。
しかしそれももうだめだ。役立たなかった、せっかくの分別も。



司会者

かがやかに、マグネシウムを散ずる、
なんじ、閃光よ。
雲を作り、
多くの時間を徒消させるもの、
異臭を発し、
閃めくものよ、
われらを最早（もはや）わずらわすな。



照明をあびた真の中性子の幕ぎれ

ワーグナー　（理想的実験家を人格化したものとして現われる。指先にて一つの黒球の釣合をとりながら、雄大に）

中性子はこなたに揺(ゆ)らぎ、
質量はそれに身を凭(もた)せ、
電荷はそれから失(う)せ、
パウリはそれの存在を信ずる。

メフィストーフェレス

霊界の気高い物が
悪から救われました。
実験しながら励むものを、



われらは救うことができる。
それにこの物の上には天上の
計算が加わっているのです。
祝福された人々の群が
歎(よろこ)んでこの物を迎えるでしょう。

神秘の合唱

すべて荷電せるものは
ただ映像にすぎず。
いくたびか成就せざりしもの
ここに実現せらる。
驚異すべきもの
ここに成し遂げられぬ。
永遠なる中性は
われらを引きて昇らしむ。

（『自然』一九六四年一月号、『科学と科学者』収録）



座談　物質とは何か

三宅剛一
下村寅太郎
渡辺慧
朝永振一郎

物質の究極的要素について

下村　特別に用意した順序はないのですが、いろいろお話を伺いたいのです。まず物質とは何かという場合に、昔から物質の要素——アトム（「不可分者」、「原子」）というようなものを考え、要素からの物質の構成というふうに考えるのが一つの定型のようになっていますね。だからその意味で、物質の構造の問題としては、原子論（アトミズム）は昔からあるものではありますが、しかし近世の原子論と古代の原子論との違いは、いうまでもないことですが、古代のは一つの概念的な推論や類推から考えられたもので、それに対して近代の原子論は実証的・実験的な立場で考えられたところにある。ところでさらに原子が真の「原子」、「不可分者」でなくて、さらに原子そのものの構造ということが問題とされて、そこに素粒子というようなものが認められ、エレメントのさらにエレメントへ

と進み、そういう方向へ進んで来たわけですが、現在の素粒子も単に現在の段階で素粒子と考えられているだけのものでしょうか。あるいは理論上それが最後のエレメントだと考えられるような根拠があるものですか。単に事実上、現在ではそこまでであるというだけなのか、あるいはある程度まで理論的に、それを究極的なものと考えうるか。そういう見通しはどういうものでしょうかね。

朝永　それがわかれば、われわれは苦労しないのですが……、現在素粒子といってもいろいろなものがあります。例えば電子（エレクトロン）とか、陽子（プロトン）とか、光子（フォトン）とかいうようなものがあります。そういういろいろなものがみんな同じ意味のものか、あるものはもう不可分的かもしれないが、他のものはそうじゃないかもしれません。そういうことは、いまのところわからないというよりしかたがない。しかし例えば電子というような場合に、それがエレメンタリーなものであるという意味が、いままで十九世紀頃にアトムというようなものをエレメンタリーであると考えたのとは、多少意味が違うということはいえると思う。

下村　どういうふうに考え方が違うのですか。

朝永　例えば十九世紀までのアトムというものは、それ以上分けることができない粒子というふうに考えられていた。ところが現在の物理学での素粒子は粒子という文字が用いられているが文字通りの粒子ではなくなってしまって、例えば分けることはできないということは考えていても、それが普通の粒子のように、この粒子、あの粒子、例えば撞球の球のようにAの球、Bの球というように名前をつけることができないのです。つまりインディヴィデュアリティー（個体性）がない。

三宅　インディヴィデュアリティーがなくなったといわれるのは……。

朝永　インディヴィデュアリティーということが、分けられることができない一つのまとまった単位であると

いう意味では素粒子もインディヴィデュアリティーを持っている。しかし……。

渡辺　「あれ」、「これ」といえないという意味では個性がない。

朝永　自己同一性がない。

下村　自己同一性がないという根拠は、例えば、それをさらに分析する手段とか方法がないからというのですか。つまり単に事実の上でそうだというだけなのか、あるいは理論的にそうだといえるのですか。

朝永　もちろん、事実の上です。実験的にそういう結論が出てくるのです。

下村　しかし単に実験的という場合には、実験の方法というものが将来例えば発展するということを考えれば、もっと分けうるという可能性はあると言えないものですか。

朝永　その可能性というか、それはないとわれわれは考えているのです。

下村　すると、理論的にそういうふうになるということですね。

朝永　そうですね。

三宅　同一性ということですが、そういう個々の粒子のような形で同一性があると考えられるか、それとも何か他の形で同一性というものが考えられないものですか。

渡辺　同一性というものを考えようとすれば、究極において何か時間的に保存するものをとらなければならない。保存則というものが基礎になれば、「あれ」とか「これ」とかいえないわけです。粒子の個数というものの保存則がなければ、もちろん個々の粒子の同一性は認められなくなってしまう。また仮に粒子の集団の個数について保存則が成立しても、それぞれの粒子について、時間・空間的に連続的に「一個の粒子」というものが保存されなければ、その個性は認められない。ところで保存則として最後に残るものは、結局エナージー・モーメン

タムの保存則です。そういうものに結びついたものについて新しい定義を作れば、いまいった同一性というものが再び認められるかもしれない。個々の粒子ではない。

朝永 もちろん、いまいった保存則を頼りにしたある程度の同一性は考えられるのですが、けれども例えば、ここにあった粒子がなくなったということがわかり、次の瞬間に、あちらにそれと同じ性質の粒子が現われたということがわかったとします。そのときあちらに現われた粒子が果してここにあった粒子であったかどうかという問題がある。そういう問題について現在の理論を厳密に適用すれば、それは問題にできない事柄だということになるのです。だから粒子といっても通常の粒子の概念をそのままもってきてはいけない。

三宅 連続的にトレースできないというわけですね。

朝永 そういう時に保存則が成り立つわけでしてね。ここにある粒子が消えてあっちに現われてきたという場合に、ここにあった電気容量やエネルギーと同じ量の電気容量やエネルギーが、あっちへ移るということは成り立つのですが、ここにあったもの（粒子）と、あっちに現われたものとは、別のものか、同じものか、いまの理論ではむしろそういうことは考えてはいけないのだと主張するのです。

渡辺 同一性を有するものとしての定義を、物理学的に定義しなおせば、同一性を保つ何ものかがあるというわけですね。例えば全体のチャージ（荷電）ですが、そういうものをとって、それの同一性ということは拡張された意味で保持できるかもしれないが、しかしその場合でも「この」チャージが、「この」荷電が、というのでは保存されないといえましょう。そういうことはありえないということになる。

下村 そういうことは別の言葉でいえば、粒子という概念の限界に到達したわけですね。

朝永 そうです。電子というものがさらに分けられるというようなことに何らかの意味があるとしても、普通

にここにあるこういう南京豆みたいに分けられるというようなものじゃない。南京豆のようなものではもともとないわけです。そういう意味で……。

下村　そういう意味では、本来のアトムという概念の限界に達したという意味で、最後の要素、究極的な要素と言ってよいでしょうね。すると先ほどの問題の、現在の素粒子が、単に事実上というだけでなく原理的にも最後の要素だといえるわけですね。

朝永　まあそういえると思うのですがね。ただしはじめに言ったように、素粒子のなかにもいろいろなものがあって、一概に議論はできないかもしれません。

渡辺　もう一つ、過去の原子と違うことは、結局さっき話に出たように消えてなくなることがあるからです。ですから究極的な、何というか、煉瓦のような構成要素で全部出来ていて、それらの組合せを変えていろいろのものが出来るというのとは違うわけです。その点は古代の原子論とはかなり離れている。

下村　「原子」（不可分者）という概念の限界という意味で、最後のところまで来たと言えないですか。

渡辺　最後だかどうだかそれはわかりません。そしてまた一つの光子が消えて陰陽二つの電子が生じるのを、光子が電子に分かれたともいえる。

朝永　「原子」という概念は、分けられないということ以外に、生れもしないし消えもしないという、もう一つの性質をもっている。ところが現代の素粒子は生れたり消えたりします。

下村　つまり自己同一性を保持するのは、個々の粒子としてではなくして、一つのシステムとして同一性を保つというわけですね。

保存則について

三宅　渡辺さん、メイエルソンがね、同一性ということは、結局時間を通して持続するものというように考えて、それは物理的科学の一つのイデーみたいなものだということをいっていますね。だから形は変っても、何かの意味で同一性ということがなければならない。それがコーザリテ（因果律）の考えで、ロア（法則）という考えで行くのは、実体的なものを問題にしないで関係だけを考えるポジティヴィズムだというわけです。だからリアリスティックに考える時は、同一性を維持するものを認めねばならぬというのですね。それである形では同一性が考えられなくても、何かの形で考えることができるかどうかというような問題ですがね。

渡辺　いま「イデー」とおっしゃったように、私も同一性はそういう性格のものだと思います。自然科学の一つの方針だろうと思います。メイエルソンにいわせれば、コーザリテを同一性という形で捉える。それはどうしても科学の一つの何というか、方法として認めなければならないものと思います。ただその場合に、メイエルソン式に保存されるものは何かというと、結局非常に限られたものになってしまう。エネルギーとか、チャージとかです。そんなものしかなくて、他のもの、いままでそれ自身で保存されたと思ったもの、電子、原子、そういうようなものは全部同一性保持を失ってしまった。それでも物理学の体系はまとまる。ところで、もっと哲学的な問題になってしまうが、保存則というものが、われわれ観測者を離れて、客観的に見つかると、いままでの物理は考えておったわけですね。そういうものを考えておったわけですけれども、そういうものは必ずしも成立するとはいえない。観測された結果だけを扱うと保存則は必ずしも成立しない。今日の形における保存則は、やはりそれは一つのイデーであって、観測者をも含めた全宇宙について保存されているという建前と解すべきでしょ

う。例えば実際観測すれば、エネルギーというようなものでも、観測の仕方によって、保存しない観測の仕方もある。一般的に保存則というものは、観測と切り離して、被観測体については厳密には成立しないはずだと思う。ですから保存説というようなものにあくまで固執すれば、かえって自然科学の限界を超えて、観測者を含んだ全宇宙の観測者というようなものを想定する、科学的に意味のないものを想定することになりましょう。

三宅　全宇宙というと……科学的に意味のない？

渡辺　科学的に意義がない。保存説はだんだん発達してきて、いまの形で書いてある保存則は、そのままではただちに観測結果を意味するものではない。観測上は保存しないことがあるわけですね。保存則をやめろとはいわない。ただ十九世紀の意味とは非常に違うということを注意しなければならない。いわばイデーであって、ただちに現実に観測したものが、すべてそれに従って行くわけじゃない。エネルギーの不確定性原理も出て来るわけです。しかしこっち、すなわち観測体系をも含めていえば保存しているわけです。

朝永　イデーと現実というものは分けられるのですか。

渡辺　イデーということを三宅さんがお使いになったから、仮りに使ったわけです。直接に観測されるものではないが、われわれが法則を書く時の方針といった意味です。

三宅　私はイデーという言葉はあまり好きじゃないが。

実験について

三宅　それとちょっと、数学と実験のことですがね。朝永さんのお書きになったものをあまり読んでいないのですが、物理的経験というものが、ある面でアクチーヴというか構成的だということがいわれると書いてあった

と思いますが、まあ数学的の理論の方は、明らかに構成ですね。実験というものでも、理論的な予想をもってしかけをしてゆく点で作り出すということもある意味ではいわれるのですね。自然的に与えられていないものを実験で引き出すとして、その引き出されたものの振るまいまでを規定するという、そういう意味で作り出すということがいえるのでしょうか。

朝永 そうでしょう。

三宅 しかし実験というものも、ある意味で、現実にそれを抑えているような条件から切り離して、一つの物理的過程を開放して、出して来ると、そういう意味では、これまでなかったものを作り出すということはあるのでしょうが、開放したもの自身がどういう仕方で立ち現われるかということは、こっちで構成できないし、ただ見るということ、データということになるのじゃないでしょうかね。数学の理論というものは、データに対しては、データの間の関係というわけですすか。

朝永 関係が理論から導き出される。

三宅 実験は構えがあって、意図があってやるのだから、それにあてはめるような理論になっているわけですね。そこでまあ、それがこちらの構想であって、あらかじめ注文をもってはいるわけでしょうね。注文どおりに行かないか、実験をやってみなければわからないわけですね。開放されたプロセスがどうなるか、こっちではきめられない。そういう意味で、やはり対象として受取るほかはないということになるか、どうでしょうね。

渡辺 数学が超越的なものかどうかということですか。

三宅 いまの点をはっきりお聞きして、数学との関係を見なければならないと思うのです。ある仕掛けをして、それからまあ働きかけて、とにかくこれまでの実際与えられてないような過程を引出すというようなことは実験

ですね。その引出した場合に、開放されたプロセスがどうなるかということは、向うがやることで、こっちがそれを見て行くというようなものだろうと思う。それで物理学がデスクライブ（記述）するという意味からいいますと、デスクライブするということは、数学という道具を使うとしても、結局は向うにあるものをわれわれに理論的に取扱えるような形でデスクライブするというんで、構成ということの限界がどういうところにあるか。下村君らはどちらかというと構成ということに重きをおかれると思うが、今いったようなことから考えてみると、どうもリアリスティックな見方をしたくなるような気がするのですが。

「もの」の存在について

朝永　そういう問題を物理学というものは、あまり反省して考えていないと思うのです（笑）。しかしとにかく、われわれは――といっても、渡辺君は違うかもしれないが――とにかく何ものかが向うにあると思っているのですね。それは非常に素朴な考え方かもしれませんが。

三宅　私は素朴じゃないと思う。素朴なら素朴で、いい素朴で、それは本当なものかもしれないので馬鹿にできない（笑）。

渡辺　それは僕は朝永さんと大分違う。

朝永　私の考え方として素朴なところを申上げますと、いま原子論、量子論などが出来て、物理学的な世界が非常に常識とは離れた妙なものになってきた。けれどもそれは結局程度の差であって、日常生活でわれわれが素朴に考えていることが、例えばわれわれのまわりの、三次元の空間の中にいろいろなものがあるという考えと大して違わないと思う。日常の世界でも、それがどれだけ向うにあるものか構成されたものかという問題は非常に

むつかしい問題なのでしょう。そこでこの問題は何も物理学の発展が新たにもたらしたり、またその発展が、それをどっち向きに解決するとかいうことではないと思うのです。

渡辺 いまの朝永さんが最後にいわれたことは事実だと思うのですよ。外のリアリティーを物理学がどちらかの方向に解決を向けることはないという、それは認めるのですけれども、ただこの頃の物理がもたらした新しい傾向といいますか、新しい立場を、過去のものと対照的に研究してみる一つの反省はありうるでしょう。

朝永 反省というより自覚だろうと思いますね。それが結局ずっと戻って、日常の世界ですでに問題になるべきことであって、何も量子力学が出来て、はじめて問題になるものじゃないと私は言いたいのです。

渡辺 その点は同感です。

朝永 量子力学の世界が、日常的な世界よりリアリティーがより少ないとは言えないと思うのです。

渡辺 日常の世界という意味が、物理的ないわゆるマクロのものを意味するか、人間的なものを意味するか、そういうことによっても大分違う。

朝永 私のいうのはごく常識的な意味です。つまりここにこういう机のようなものがあるという考え方なのです。つまりこういう仕掛けのものがここにある、という考え方でさえ、すでに相当人間的でない考え方でしょう。

渡辺 どういう意味でですか。

朝永 つまり三次元的な四角なものが、そこにあるということは、相当な理論じゃないですか。

渡辺 一つの心理的なサイコロジカルなシンボルだと思う、そういう場合は。

朝永 そう考える人は物理学理論を含めてサイコロジカルなものですね。

三宅 サイコロジカルということはちょっとわからないね。

渡辺　出発点の問題です。一番最初の「物質がある」ということ、「ものがある」ということ、これ自身がすでに無反省にはいえないことだと思います。

朝永　それはまあそうですが。

渡辺　なぜかというと、「ある」ということ自身を直接証明する方法はないのですね。例えば、こういう動作をすれば水が飲める。こうすれば熱いということはあるが、「ものがある」ということは、命題自身、実証的な証明方法はないわけですね。

三宅　あるということは証明さるべきことじゃないですね。

渡辺　それを、しかし反省している人は少ないのであって、「ものがある」ということは、当然与えられたこと、または証明抜きに承認していいことと思っているわけですね。僕はそれはさっきいわれたように日常生活の場合からして、すでにおかしいと思う。私にいわせると、私に直接与えられた、直接証明されたところのものは、言葉は誤解されやすいが、主体と客体の交流点に立つもの、そういうもの、それがすべて証明のもとでなければならない。それから出発する。これは西田哲学といわれると困るが、それから出発して、仮りにそれを二つの極に分けて、主体と客体に分けて、主体の逆のポールとしての「もの」を考える、行動の対象として「もの」を考える。そういうふうに「もの」はいつでも考えらるべきだと思います。ものはわれわれがこうすれば、こう反応するということによって証明される。

三宅　普通にあるということの意味は、手応えがあるということ、何か向うから抵抗してくるということですね。

渡辺　客観的にいえばですね。

三宅　対象というものは、何かつき当るもの、こっちに抵抗する、広い意味のレジスタンスですね。
渡辺　それを認めるのは主体・客体の交流点みたいなものですね、レジスタンスを……。
三宅　交流するということはこれは経験ですね。
渡辺　経験ですね。そこから出発して、ものは分極によって出て来るわけですね。
三宅　経験そのものにそんなふうに分けられるようなものがあるわけですね。はじめから主体と客体があって、それが交渉するというのではなく、それは経験というものの解釈です。こちらが働きかけると向うから手応えするというような、いわば構造的なものが認められるので、勝手に分けるものじゃない。経験そのものは元来そういうふうなものじゃないですか。
渡辺　それは確かにそうです。そこで経験においてみんなに共通なものは法則であって、法則的なものが客観的にみんなに通用するから、それをもとにしてこういう「もの」があるというようなことになりましょう。
三宅　そこが一番根本問題ですね。あるといって、どういうものがあるかということは、それを限定する、デファインするわけでしょう。デファインすることは物理学的・数学的の仕方でデファインするわけでしょう。そういうふうに限定するということは、法則的の連関において限定するのだが、それからいうと構成するということになるけれども、しかし何かがあるから何かの仕方で手応えを与えるものがある。あるから数学的に限定するので、限定されるものというものは、限定によって生れるということではない。
渡辺　私はちょうど、その逆を考えている。「ある」からそれを限定するのじゃなくして、限定されたもの、まあ法則とか何とかで捉えられたもの、それを「ある」と称するのだと思います。
三宅　それは一つの考え方ですね。しかしそういう考え方が僕は問題だと思う。

渡辺　私はそうなんです。それで行かないとなぜ困るかというと、結局人間を離れた外に、人間意識より独立した「もの」があるということを、先に根本命題として仮定しなければならない。

三宅　それはね、アプリオリにどうということじゃなくて、人間の経験というものの構造がそういうふうなものなんでしょう。

渡辺　経験というものがそういうことなんだということは、われわれ人間が経験を捉える一つの仕方の型でしょうね。「もの」があるというのは、その「もの」自身が初めから人間を離れて、独立に外にある、ということの証明でも何でもなくて、それを主張する根拠がない。

三宅　人間がものを認める場合に、どうして認めるかということがあるわけですね。こっちの注文通りというか、その通りに行けば、法則的というわけですが、法則的でないからあるとして認めぬなどというわけにはゆかない。こちらの思う通りになるかならないか、抵抗するとかしないとか、そういうことから存在を認めるので、また認められるものの存在の仕方も一通りではないので、一口に人間を離れるとか、離れないとか、そういうふうにちょっといえないのじゃないか。人間を離れないけれども、やはり離れるというようなことじゃないのでしょうかね。

渡辺　人間を離れないはずであるのに、ある「もの」を人間から離れているかの如く語るのが、われわれの言葉の構造であり、われわれの考え方であって、われわれがもっているのでしょう。それが悪いからやめろとはいわない。物質概念に反対しない。ただそれには大きな前提がある。それは大きな約束事だということを忘れてはならない。

三宅　約束事でしょうかね、それは。

渡辺　という意味は、人間の外にある「もの」ということを無反省に考えると、不確定性原理というようなものが出て来た時に、混乱を起す。起して……。

朝永　混乱を起しますかしら……。

渡辺　ハイゼンベルクの不確定性原理の思考実験の説明は、いわばハイゼンベルクの言いたい結論の逆の立場から出発する。すなわち観測者と被観測物とを外から見るような第三者の立場にまず立つのです。すなわち完全にすべてを客体化するリアリティーの見方をしているのです。そのために話が混乱して、その逆効果としてあたかも客体としての物質概念が全然駄目になってしまったような印象を与える。僕にいわせると、そうじゃなくして、盲目的な客体化が誤りのもとです。「物質概念」、「保存則」、「コーザリティ」、すべて必要なのです。ただそれらを無制限に保持、主張しようとすれば、それはやはり人間を含めた全宇宙についてはじめていえることになる。その意味では、「物質」も「保存則」も「法則」もすべて一つのイデアです。それは厳密には直接観測されなくとも科学の成立に必要でしょう。

三宅　どうも話が一足とびに絶対的なものになってしまったが……。

物理学的世界像の原型

下村　それでは話を後戻りさせましょう。先ほど朝永さんは、量子論的な世界像と、古典物理学的な世界像とは、必ずしも本質的には違っていないといわれた。その問題ですが、その場合、量子論的な世界像の方がいわば原型(ウアビルド)で、あるいは一般的な場合なので、古典物理学的な世界像はそれの特殊な場合というふうに考えられるわけですか。量子論的と古典的とどちらが原型的だといわれるのですか。

朝永　どっちかな、……そう考えたいところでしょうね、物理学者は。

渡辺　hを零にした場合という言い方がありえますね。

朝永　何が原型的かということについては――原型的とおっしゃる意味がよくわからないのですが――、量子論まで一足とびに行かないで、まず十九世紀的の原子論で考えてみましょう。十九世紀の物理ではこういうもの(机を指さす)は原子から出来ているし、この赤い光というのは、ある波長の波の伝播であるというふうに考えています。ところでこの考え方ですが、それと日常的な四角いものがあるという世界と、どちらが原型的かという問題です。その場合には、物理学的世界像としては、原子論的な考え方の方が原型的だと考えるべきでしょうね。

下村　どういう意味で、原子論的な世界像の方が本当といえるのですか。

朝永　本当というと、どうも……。

下村　本当というのがいけなければ原型と言ってもよいですが。

朝永　それが物理学というものの本質なんでしょう。

渡辺　こういってもいいのじゃないですかね。論理的には量子論からならば古典的な物理学が出て来るが、量子論は古典物理学からは出て来ない、しかし歴史的にはその逆だと。

朝永　(机を指さしつつ)四角い赤いものがあるという考えで止まれなくって、原子論に行かざるをえないというのが物理学の運命だろうと思います。

下村　日常的な世界像がつまり原型的でないという理由はどういうところに……。

朝永　理由はそれによって世界像の統一が得られるということではどうです。

三宅　分析を進めればそういうふうになるでしょう。

朝永　日常的な常識的な世界というものが、すでにわれわれの直接に受入れる印象そのもので満足している立場にくらべれば、よほど科学的、物理学的な意味で分析の進んだものでしょう。そして、それによって、われわれのはなればなれの印象を相当に統一することができた。

三宅　それはですね、ちょうどニュートンの時代のロックという哲学者がいますね。あの時分の考えでは、感覚的に与えられる性質に対して、いわゆる第一性質からできている物体がそれを生じる原因として考えられる。その原因は直接には与えられないのだけれども、推理によってそう考えた。ちょうどそれと同じように実際に見られるマクロの変化に対してその原因として客観的のミクロのものが考えられた。その場合、「原因」というのは漠然としていますが、とにかくそういうように考える。今の場合のマクロの方の写真とか、実験装置に対するある変化に対して、それを起す原因というような意味でミクロのプロセスを考えている。そういうふうにパラレルな推理が、一つ進んだ段階で行われる。そういうふうなことじゃないのでしょうかね。

朝永　まさにそういうことだろうと思うのです。

三宅　その場合にですね。一枚の写真に出るというのは、ミクロの何かのものが写真に出て来る。われわれはその写真から推論してゆく。いろいろな実験から行く場合に、ミクロの世界は推理でもって探って行ったという性格が非常に強いですね。直接見るといっても、何かマクロのエフェクトしか見えない。僕は実験のことを知らないでいっているのだが、推論が勝ってる。そういうところで非常に理論的な対象と考えられますね。

朝永　考えられますね。しかしそれはやはり程度の違いだろうと思うんです。われわれの感覚的なもの、感覚である形を感ずる。触ってある抵抗を感ずる、それからこういう三次元の空間の中に、こういうもの（机を指さ

す）があるということを推論してゆく。これは相当の推理の結果ですね。それから例えば普通のものが写真に写るということでも、写真に写ったという実験——実験というほどでもないが——の結果から、そのレンズの向うにそういうものがあったという結論をするのは、われわれにはあたり前のことのように思っていますが、これをやかましくいえば光学というやはり相当の理論をもっているわけですね。ですから直接そのミクロの世界が写らないからといって、写真の像から、向うにそういうものがあったということを推論するのとそれほどひどい違いはないと思います。それだからこそ物理学というものが万人に理解されうるのであって、学びさえすれば誰でもが原子のことを云々できるだろうと思います。

下村　そこで、さっきの続きになるわけですが、原子論的な物理学が、物理学的の原型であるとすると、自然認識の構造や原理や方法とかを考える場合には、原子論において考えることが一番徹底した立場であるということになりますね。古典的物理学からは量子論は出てこないが、量子論からは古典的物理学が出てきうる、という意味で。すると原子物理学において自然認識の原理とか方法とかが、端的な形で出ているといえるわけですね。

朝永　端的という意味はどういうのですか。

下村　つまり古典的物理学の場合は、特殊の場合だから、ただちに自然認識一般の理論にはなり難いという意味で……。

朝永　つまり一般ということを重要視すれば、そういうことになりましょう。普通のマクロ的な見方では、同じ原理にはめ込むことのできなかった現象が、一つの原理の中にはめ込まれるという効能はあるわけです。例えば日常的な自然認識の場合もそうだと思うのですが、（茶碗に触りながら）眼で見た印象と手で触った印象とは、バラバラのものですね。それがこういうものであるという考えに入れると、それが統一されるわけですね。そう

いう意味で原子論になるともっとそれがものの色だとか温度だとか、眼から入ったもの、感覚から入ったもの等が統一される。そういうことが原子論の効能でしょう。

下村 伺いたいのは、古典的物理学が特殊の場合だという、その特殊性の由来というのはどういうところにあるかということなのですが。

朝永 特殊性の由来というのは……。

下村 先にお話しのように、原子物理学から古典物理学は導出しうるが、古典物理学から原子物理学は導出しえない、という意味で、つまり原子物理学の方が一般的、原型的で、それに対しては古典的物理学は特殊な場合だということだったでしょう。その特殊性というのはどういうところにあるか、その特殊性は何によるか、ℏを零と見なしうるような領域とℏが重要な意味をもつような領域との区別というようなところにあるというようなことでよいのですか。

朝永 まあそうでしょう。

渡辺 人間の大きさは大体そういうもの、そういう古典物理の対象くらいの大きさだ。くわしくは人間的な作用は多くの場合ℏよりずっと大きいというくらいでしようがないのでしょうね。

下村 それがさっきの古典物理学と原子物理学との関係の問題に関係してくると思う。というのは、いかにミクロの世界でも、経験の立場からは、何らかの意味で、見られたものという性格をもっている。さっきの朝永君のいわれた温度の感覚とか、その他いろいろな感覚にしても、結局見られるものに還元しなければならないわけですね。だからやはり見るという立場に立つわけですね。原子の現象の実験にしても、実験の装置そのものはマクロ的な存在でしょう。直接見られるものはマクロ的なものですね。ところで、そのようなマクロ的な装置でミ

クロ的なものを観察しようというのだから、結局一つの推論というか、そういうような性格のものになるわけですね。そういう意味で原子物理学も古典物理学的なマクロ的立場との関連はどこまでも離しえないわけですね。そういう意味で、ミクロの物理学が一般的で、マクロの物理学は特殊な場合だというだけではすまないということになる。両者の間にコレスポンデンスがあるわけですね。そうすると、原子物理学が単に一般的な場合だということにはならないのですが、どうなんですか。

朝永　そうです。ミクロとマクロとは単に一方がより一般で、一方が特殊だという関係ではない。それと同じようなことは、古典的な物理学と、われわれが直接受入れるもの、例えば感覚との間の関係にもあると思う。例えばある波長の波も、例えば物理学でいうある波長の光ということと、そしてそれが赤いということと、その間にも何か関係があるはずでしょう。われわれが直接受入れるものは、波などではなくて色であるわけですね。このとき波と色との関係は特殊と一般ということではない。それとやはり同じことなんでしょうか。

三宅　これはラッセルがいってるのですが、物理学がいってるようなものは、数学的でアブストラクトで、そういうふうに抽象的に物理学的に規定されるものがそれ自身どういうものであるか、そのように表現されたもののイントリンシック（内実的）な本質が何かということは、その抽象的な規定からではわからない。抽象的なものは、われわれには抽象的にしか規定されていない。それがどういうものであるかということはわからない。感覚へきてみて色とか温度とかというようなところで与えられる。そこでわれわれが抽象的に波長だとか何だとかいったものが、結局中味は、これは色であって、そしてこれは温かい、というようなことだから、普通にいってるようなマターとマインドというように、全く異質的なものの間に飛躍をして、全く違った方へ来るというようなことを考えなくても、もともと物理学はそういう内的な性質はどういうようなものであるかということを示す

ものじゃない。そこで感覚へ来て、音が出、色が出たといっても不思議はない、というようなことをいっている。これは私、おもしろいと思う。

朝永 私もそう思います。不思議はないし、それをどう考えるかといわれても、物理学者には何ともいえない。

物理的認識について

三宅 ああいう色もない音もないもの、ああいうふうになったものは、本当は色でもない、音でもないということは、すぐにはいえないということになる。それの中味が色であるかもしれない、といっても、それはラッセルなどの哲学の立場があるのでしょうけれども、ちょっとおもしろい見方だと思うんです。

朝永 われわれ実際、仕事をしている時には色もない音もない、そういうようなことをやってるのですが……。

渡辺 もう少し野心があるのじゃないかね。

朝永 野心というと……。

渡辺 野心というのはこういう意味です。われわれが観測する時には、マクロ的な機械をもってこなければならない。またわれわれの五感の領域もきわめてせまいものです。しかし自然科学としてはそれらの制限を超えようという野心を持っている。大げさにいえば、出来上った物理学は身体がきわめて小さい。例えばウィールスくらい小さくても、知性さえあれば、彼らにも通用するところのもの、そういうところのものを作ろうということですね。例えば、色や音が聞けないような種類の動物があっても、われわれの理論が通用するようなものを作ろうということ、そういうことなんです。そういう野心があるということをいったんです。今日の意味のせまい人間のみの観測論は仮に別としても基礎方程式というようなものは、そういう野心で作られる。

朝永　物理学の狙っているところはまさにそこなんです。そこなんですが、通用するという意味がね……。

渡辺　彼らの感覚にも通用する形にして行くわけですね。赤とか青とかいうのでは人間だけにしか通用しない。それをもう少し超えて……。

三宅　赤とか青、音というようなものは、それはそれきり、受取るだけのもので、それをわれわれが自由に処理することができない。どういうふうにしようかと思っても、色や音になったところではどうにもならぬ。それを物理学で自由にわれわれが処理するところへ行くには、やはりそういうもののないところの領域へもって行って、いろいろな色や音をわれわれの思うようにコントロールするということですね。色や音になったものは、これはもうわれわれの思う通りにはコントロールできないから、そういう意味で、物理学というものは、ものの本質を知るというよりはものを処理するということを非常に細かいものまで緻密に処理してゆくという意味がね。そういう立場があるわけじゃないですかね。

朝永　必ずしも細かいということを狙っているのじゃないと思います。つまり自然現象をできるだけ離れ離れでなく取扱うということの方が狙っているところだと思います。それがおのずから細かくなって……。

渡辺　そういうわけですね。

三宅　物理学の理論的な目的とすればそうなのでしょうが、しかしまあただ眺めるということ、理論としてみるということじゃなくて、やはりコントロールするということがあると思うのですがね。

朝永　そうですね。

三宅　理論的に統一するといっても、コントロールできるような形でもって統一するというわけですね。人間の関係するしないというのは、そこがあるのでしょうね。人間を離れてそれ自身でどうということが、たとえわ

かったとしても、物理学的・技術的にものをコントロールする役には立たぬかもしれない。神様でなければね。物理学の立場というものは、相対的なわれわれのものに対する関係でしょうね。

渡辺　それはさっき僕のいったことなんですがね。

三宅　さっきよくわからなかった。そういう意味なら……。

渡辺　結局物理学の法則というようなものは、それ自身は一つのやはり手段であって、科学の本当の命題、科学が本当に最後に出す報告書、白書というものは、「こういうことをすれば、こういうふうに自然がなるぞ」という形であるはずです。例えば、「こういうことをすれば原子爆弾が落ちてどうなる」という形です。自然の人間に対する反応を具体的な経験可能な形で教えることが、科学の究極の報告であって、方程式とか法則とかはそれまでの途中の補助手段ですね。

三宅　それはそうですがね。こういうふうに働きかければこういうものが出来るという事態そのものは、これは人間が自然を処理するということ、出て来たものを合理的に把握して取扱うという立場にとりこんでしまえるものではない。出て来たものの処理、また処理のできるように働きかけるということは物理学でやるのですが、ある装置をした場合にあるものが出て来るという、そこに何が出て来るということ自身はそういうプラグマチックな立場を超えたリアリティーというような意味があるのじゃないですかね。

渡辺　その法則性というものの客観性は、私も重々認めます。

法則について

三宅　法則性という意味のリアリティーと、与えられたものとしてのリアリティーとはすぐに一つにはならな

い。法則性ということは、与えられたものをわれわれの合理的な手段でもって限定する場合の手形みたいなものじゃないかね。法則性に合わぬものが出てきてもしかたがない。それは法則を変えて行って何かの法則が出るかもしれないが、しかし出ない時——といっても絶対的にはそういうことはおそらくないので、相対的な程度的な話ですが——いまの力でもって、法則的に処理できないものが出てきても、だからといってそれを認めないわけにはゆかないと思う。

朝永　出てきたらね。

渡辺　しかしさらに包括的な法則というもので整理できるという信念をもっている。

三宅　信念は当然あるでしょうが……。

朝永　その信念をなくすと、われわれの商売はなくなってしまう（笑）。

渡辺　合理的に捉えられないものは、偶然といっている。われわれの無知に由来する偶然も考えられるが、そのほかに合理的に把握できない根本的な偶然も考えている。

三宅　根本的な偶然というのは、物理学的にとれば、法則に入らぬということですね。

渡辺　上手にやれば何とかまとめられるという希望を一応当然持つべきであるが、それがどうしても法則に捉えられないようなものが出てきた場合には、根本的な偶然だというよりしかたがない。実は何か裏に仕掛けがあるとは思わない。

三宅　法則性というものにタイプのちがいが考えられないか。例えば、生命現象のような場合、生きたものがなくても、死んだものの世界でも物理学が成り立つ。生きたもの、特別な有機的な組織をもったものがあるということは物理学にとっては偶然だ。将来の可能な場合として、生命現象は物理学的にちゃんとやれるかもしれな

い。しかしやれないからといって、それは偶然といっても、物理からいえば偶然かも知れないが、存在としてそれは段階が違うだけじゃないでしょうか。

渡辺　生物の問題はそうじゃないのじゃないですかね。自然科学としては、ミクロからマクロが出てくるように、やはり物理学からいえば、生命現象といえども、物理化学的に説明されるという立場に立つでしょう。

三宅　物理学者としてはね。

渡辺　物理化学的な特定な構造の上に出てきたところの生命というものは、一つの「質」といえるでしょう。一つの例でいえば、客観的に扱うならば、ただ特定の波長であるものを赤とみる。またある波長はうまい、ある波長はまずいというかもしれない。同様に特定な物理化学的現象を、われわれが生命と認め、または死と認めるということになるのじゃないですか。もちろん物理学者の立場からいうのです。偶然ではなく特定の物理現象だというわけです。

三宅　それは、生命というようなものは単に人間的な理解の仕方で、自然科学的・客観的にはただ物理的過程があるにすぎないということでしょうが、自然科学が、方法的に一つになるかならぬかということはそう決められない。

渡辺　物理学者の立場のみではなくして、広い科学者の立場でも、科学的な立場、すなわち客観的な面からも捉えて行くとすれば、生命現象も科学的に把えることができるだろうと思いますね。

三宅　その場合、客観的といわれているのは、法則性のあるタイプを限ることだと思います。いろいろなタイプの客観的ということを認めるとすれば、話はそれほど簡単ではなくなるでしょう。しかしそれは何もドグマチックにそうだというのではない。偶然性ということは、ある立場に対しては偶然性であっても、他の立場で意味

をもってくれば、偶然とはいえないのではないですかね。

渡辺　広い意味ではそうだと思います。例えば私が生活体験の面で、偶然不幸であるということは、客観的にみれば、何故にまさに私が不幸であるべきかはわからない。完全に偶然である。しかし私が私の生命目的の主観的自覚よりみれば、偶然というだけではすまない。そこに意味がある。それはそれで別問題で、今の話題と少し違うと思います。客観的にいった偶然は、合理的に捉えられなかった時に起るのが偶然じゃないですかね。

下村　原則として偶然を認めないということは科学のイデーですね。

渡辺　そうだと思います。

下村　ところでその場合、偶然は認めないというそういう物理学の立場、そういう物理学のポステュラート（要請）、あるいはイデーそのものの根拠はどういうところにあるのですか。

渡辺　根拠というのは、心理的な根拠ですか、それとも実在的な根拠ですか。

下村　どちらも伺いたいわけです。

渡辺　それは人間がマクロの物的な対象を生活活動の対象とするように出来ている結果、生れてきた思想のタイプだろうと思います。それをわれわれが棄てることはどうしてもできないだろうと思う。あくまで合理的に、しかも因果的に全部捉えようと試みる。

下村　心理的にそういう習慣だということだけでは、原理的にそういう考え方をせねばならぬということはいえないですね。

渡辺　自然科学としてはそうだと思います。

下村　心理学的理由としてそういう考え方の習慣だというのでは、いままでそういうように考えていたという

だけのことですね。そう考えねばならぬ理由にはならない。

渡辺　心理的に性格をAタイプ、Bタイプというわけではなくして、人間の本性になっているもので、むしろ人間の認識の型というべきものだと思いますけれども……。

下村　そういうことが、偶然性を認めないという、物理学者としての究極の立場ですか。

渡辺　認めないというのは……。

下村　偶然を認めないことを科学のイデーとする意味です。

渡辺　それで、さっきの話に戻ってきて、偶然性を認めないでいこうとすれば、全宇宙ということを考えれば、偶然性がなくなると思う。いまの量子論でもなくなると思う。

下村　ポステュラートとしてでしょう……。

渡辺　ポステュラートではないと思う。理論体系が……。

下村　理論として構成されるという意味ですか。

渡辺　そうです。

下村　単に事実の上でそうだというだけではなしに、ポステュラートとして立てなければならないというのでしょう。それをポステュラートとして立てる根拠というものは、単に人間性とか、人間の思惟の習慣ということだけでいいかが問題だと思うのですが。

渡辺　発生的に見れば、人間の範疇や直観の形式はすべて、経験、特にマクロ的経験によって形成されたのに違いない。しかし一転して人間が主体的に経験を把握する時には逆に、それらの範疇や形式が根本的な出発点となって、それにふさわしいように経験を統一する。客観的に外から見れば、経験が範疇を作り、逆に内から主観

的に見れば、範疇によって経験が成立する。しかしそのどちらの一方も、その一方だけをとって根本的とはいえない。

下村　問題は、そうして出来た範疇がどうして根拠をもつかということです。

数学と記述について

三宅　少し話をかえて、前にいった実験と数学のことでおききしたいのですが。数学で実験的に出てきたものをデスクライブする、あるいは表現する。その時に物理学的にそこにあるものの構造と、数学のデスクリプションの構造と、コレスポンド（対応）しているというようなことがありますかね。幾何学的な像が出来れば考えやすいが、幾何学的な像が出来ない場合には、ちょっと考えにくいわけですが。数で表わすというようなことは、かなり自由で、いろいろな表わし方ができる。計量の仕方によってもちがってくる。しかしいろいろな表わし方の間に、またそれと対象の構造との間に何かの対応があるかどうかということですね。適当な例でないかも知れませんが、例えばNというものが数記号として1, 2, 3, 4, 5, …というふうなものだとすれば、Nとして表わせれる現象にも、それに応ずるような1, 2, 3, 4, 5, …としてしるしづけられる順序とか何かがあるようなものならば、それは一種の対応があるといえます。そういうように形式的な構造として、数学的表現形式と実際の対象の構造との間にコレスポンドするというような関係が考えられますか。

朝永　物理学者はコレスポンドする対応があると考えるでしょう。

三宅　直観的な像のある場合は簡単ですね。例えば波なら波というものを、われわれは、中心から次第に広がってゆく形でみるのですが、そういう構造が何か数学の上に表われるでしょうか。トポロジカルの関係を考える

と、これの周りにこれがある、これに接してこれがある、ということは数学でも意味があるが、実際の現象にもそういうことは認めなければならぬ。そうすると、数学的な表現の仕方と、物理的なものの構造とが対応するというようなことがいえはしませんか。いま量子力学があいうふうなものになった場合には、幾何学的な像が成り立たぬというのは……。

朝永 成り立たぬという意味は……。

三宅 直観的な像ができないのですね。

朝永 量子力学の数学的な体系では、対象について実験したときにどういう結果が出るということをあらゆる場合に理論がいってくれるわけです。そういう意味で対象の構造と数学との対応はあるわけです。

三宅 途中の数学の式の変換のようなものには何も対応はありませんか。

朝永 例えば光の波を考えたとき、その波が光源から出てきて眼に入るというようなことを考えます。そのとき眼に入るまでの途中には何の実験もやらないけれど、その途中を波で来るということが、物理的なものと対応が何らないということは言えない。なぜならその途中にいろいろな障碍物をおいた時に、いろいろ眼に入る像が波の干渉に相当したものが現われてくるといえるという意味で、途中の観測というものと関係があるわけですから。

下村 三宅さんのいわれるコレスポンデンスというのは、幾何学的なビルド（像）を最後まで維持できるかどうかということですか。

三宅 それを維持できない場合でも、そのものが数学的な構造をもつかどうか。数学というものは一種の言葉だというが、数学は単に言葉であるか、あるいは言葉に対応するような形式的構造が、何かの形で実際の現象に

考えられるかどうかということです。

朝永　それは間接かも知れませんが、数学的な構造は一つ一つ実際の観測に何かしら匹敵する……。

三宅　実験の結果というものは、ところどころにしか与えられない。その間をつなぐものは理論の中に数学的に表現されるでしょうか。

朝永　そうです。

三宅　だから中間もやはり、やってみるとだんだん数学的に表わせるというものですかね。

朝永　そうでしょう。

三宅　認識論で模写説（コピー・セオリー）はいけないというのですがね。写すといってもいろいろな写し方があり、考えようによって、数学で現象を写すということがいえないかどうかということを考えるのですがね。

渡辺　翻訳の手段が必要なんでしょうね。数学の式そのものが自然にあるとはいえない。数式の上で出てきたものを実験と対応するようにどういうふうに翻訳すべきかというフォアシュリフトをもっているわけですね。それを全部除いて、ただちに数学的なものが実在的なものといえるものではない。

三宅　翻訳の手段があるとすれば、何かの対応が出来るのではありませんか。

渡辺　翻訳はきわめて複雑になることがあるでしょうね。式は簡単でも実験的にはおそらく難しいことを意味していることがありうるでしょうね。理論の本質はむしろ翻訳の手続きのうちにあるとさえいえる。

三宅　簡単といえますか。必ずしも簡単ではない。一字で書いているものでも、崩せば簡単ではない。対応を考えるとすれば、数学的表現は十分展開されたいわば論理的に整えられた形として考えるべきでしょうね。

渡辺　数学的処理の途中の操作は必ずしも一義的に決まっていない。途中に現われるすべてのものが向う、す

なわち外界にあるとはいい難い。何か翻訳の仕方によって対応が出来るでしょうが、必ずしも一つ一つ向うに対応物があるとはいえない。いちいち対応物を作るために、難しいものを使ったり、簡単なものを使ったり、式を書き変えたりすれば、現実的なものと対応できるかも知れないが、そのことから数学の式がただちに向うのものをそのままアプビルデン（映す）しているとはいえない。例えば変分原理の仮想的変分などは現実に何の対応物もない。

三宅　その場合には数学の式を理論的に整理しなければならないですね。

渡辺　整理、いや、いくつあってもかまわない。

三宅　論理的な整理ですよ。

渡辺　整理すれば同じことになるに決まっている。同一現象の取扱いについて片方は解析学的方程式、片方は代数的方程式というような二つの取扱いができる場合に、どちらも正しいし、また一方から他方へ移れる。しかし一方の方が論理的だとはいえない。またどちらが現実に即しているということもいえないわけですね。

三宅　現象がなまの日常的な形で与えられれば、それは数学とは一致しないが、それを分析していって、エレメンタリー・プロセスみたいにした場合には、現象そのものはかなり数学的形に近づいてくる。数学的に扱える形にしなければ、物理学的に理解される現象といえない。要素と関係ということを考えれば、数学の表わし方も要素に当るものと関係に当るものとが用いられる。そうでないと表現あるいは記述にならないのではないか。たいへん抽象的・形式的な言い方ですけれど、デスクライブするということはそういう意味があるだろうと思うのですが。

渡辺　例えば一メートルをへだてて、一つの電子について、二つの観測を行なったとする。その時、数学的に

延長して、途中の関数を作っても現実に途中の状態にコレスポンドしているとはいえないわけですね。実際にそこでは観測しないのだから。AならAというところで、特定な装置をして結果を出す時に、その観測の影響が無限大の速度でA以外の場所の波動関数に波及する。それは物理的な影響ではない。このような波動関数は必要であり有用であっても、ただちにこれが実在に対応しているとはいえない。また例えば偏光子を横向きにしてやった結果、偏光子を立ててやった結果、そういうあらゆる観測を含む波動関数が実在するとはいえない。そのあらゆる場合を含んだ関数自身はそのまま観測にはかからない。波動関数が個々の電子のリアリティーにコレスポンドしているとはいえないのでしょうね。立てた結果とか横にした結果といえばリアルな命題であるが、一個の光子のウェーブそのものがリアルだとはいいかねる。

朝永　こういうふうに手を立てるとか、横にするとか、こういうふうに実験すればどうなるかということは決まるわけでしょう。

渡辺　ですから、そういう翻訳の仕方をして、はじめてリアルなものに対応するわけでしょう。しかし、この場合一定の状態（一定の波動関数）と一回の実験結果と一対一の対応がつかない。無限回の実験に対応する。

朝永　翻訳の仕方が決まってはじめて対応がつくのでしょうね。ここに光の波が来ている、それが赤くみえる。赤くみえるということが決まれば、その光がそこでわれわれがある実験をやった時に、どういう結果が出るかということをそれで決まるようなものがそこにわかっているならば、そこにそのものの状態はそうだといっていい……。

渡辺　いっていいか悪いか、翻訳の操作は要るわけでしょうね。

朝永　いくらいくらの波長の光は赤いという翻訳ならばね。

渡辺　ええそうですが、例えば電子のような場合、Aに来る電子がいくつ、Bに来る電子がいくつということを合せたような波がある。その合した波動（重畳波）が現実に対応していると言ってみたところで、それじゃ実際一回の実験をやってみると、両方合したようなものは出てこない。AかBかどっちか一方をとる。あなたの流儀でいえば翻訳の仕方が悪いわけだ。実際はそういう合成波が実在しているわけだというのでしょう。しかしリアルな実験で験してみようというと、片方しか出てこない。

朝永　それでいい。

渡辺　われわれにはそういう言い方もわかるが、物理学者以外の人はそこを注意する必要がある。有限回の実際の実験に直接つながらないもの、特に影響が無限大の速度で波及するようなものをリアルと見ようというのだから。

三宅　たいへん簡単な場合ですが、例えばこれとこれと一緒になる場合に、プラスと掛けるという一緒になり方があるわけですね。そのプラスとか、掛けるとかいうことが物理的な現象が一緒になる場合のある仕方を示している、というようなことはいえましょうね。プラスも掛けるも一般的ですが、プラスで表わされ掛けるで表わされる現象同士の間にもそれぞれにこれに応ずる一様性があるわけでしょう。プラスや掛けるが単に式の整理のための操作なら別ですが。

渡辺　プラスの場合にはどういう意味をもつか、掛ける場合にはどういう意味をもつかという翻訳の字引きがなければ……。

三宅　字引きがなければならぬわけですね。字引きを通してコレスポンドしているわけですね。

下村　この問題は、一般化して言えば、数学のフィジカル・ミーニング（物理学的意味）ということですね。

数学式と物理学的事実との間に一義的なコレスポンデンスがあるかないかという問題になるのではありませんか。その場合に、一般的に言えることは、数学というのは経験事実から独立に、アプリオリに、単に可能性の立場で成立しうる。だからいちいちフィジカル・ミーニングをつけるということは、もちろん可能の場合もあるが、一般的に不可能です。不可能というよりも互いに独立の立場ですね。数学と物理学的事実とのコレスポンデンスは直接的にはないわけですね。

三宅　数学の式がたくさんあって、その中から特定の式だけがフィジカル・ミーニングをもつので、それを物理学者が選び出す。数学者の方で初めからこれは物理的なものだということはいえない。純粋な数学自身はもちろん自然の記述ではない。

下村　そういう場合にどういう数学を選ぶかということは、ある程度任意で、便宜の問題で、したがってさっきお話しのような、途中においてもコレスポンデンスがあるか否かというようなことは抜きにして結果においてある一定の実験的事実が、数学的に正確に表現されているかということが問題なのですね。途中はいいんでしょう。フィジカル・ミーニングをつけうるかもしれないが、そういうことは問題にしないのですか。

朝永　どういう実験、どういう観測をやっても、途中でやっても、どこでやっても、観測の結果を正確に与えてくれればそれでいい。

下村　コレスポンデンス（対応）といっても、ビルド（像）の上でのコレスポンデンスはなくてもいい、ただ数学的に表現・記述され、そういうところに近代科学の、特に近世の物理学のノミナリズム（唯名論、名目論）の立場がずっと続いているといっていいのではないか。だからフィジカル・ミーニングといっても直接の意味でなしに、単に形式的なコレスポンデンスがあればいいといえるわけでしょうね。

朝永　(湯呑を取りながら) 例えば普通の日常世界にこういう円筒形のものがあるとする。このときこのことと経験との間を翻訳する字引き、つまり上からみれば丸いものがみえる、横からみると長方形のものがみえる、という翻訳する字引きがなかったら、ここにこういう円筒形のものがあるということは何の意味にもならない。

下村　その場合の翻訳のプリンシプルは必ずしもビルド (像) にならない。単に形式的なコレスポンデンスがあればよいという意味ですね。

朝永　そうです。この円筒形の場合だって、上からみれば丸い、横からみれば四角いという間の関係は、考えてみればやはりかなり複雑な翻訳の仕方ですね。

渡辺　だけれども、古典物理学と量子物理学の関係について一つだけ注意しておかないと、素人に簡単に誤解される恐れがあります。という意味は、実在的なものに対応するといいますが、例えばある途中の状態がAか非Aという状態にあるとしましょう。Aか非Aという状態でわれわれはビルドを作っている。実験すればどっちかになる。ところが数学的に使っているものは、Aと非Aとを一緒にしたようなものである。そういうようなものは、朝永さんの翻訳の仕方というのは、つまり無限回実験をやってみれば、Aで出てくる場合が二分の一、非Aと出てくる場合が二分の一ということで、統計的にコレスポンドするわけでしょう。実際朝永さんはコレスポンドしているというが、両方混ったものがある、かといって、実際実験してみると、どっちかしか出てこない。そういう意味で古典的な場合と違う。上からみると丸いということと横からみると四角いということは両立する関係ですね。量子論的な場合で、二つの性質が混っているという場合に排中律の成立しない場合がある。

朝永　排中律というと……。

渡辺　つまりAと非Aと全く逆なものが一緒に混っている場合がある。詳しくいえば、Aが非Aを決定する実

験と両立しない他の実験で定めた状態にある時、「Aかまたは非Aである」が必ず成立するとはいえない。統計的には融合できるわけだ。片方が五十万回（正確には無限回）、他方も五十万回あれば混っている場合があるが、たった一つ取り出せば、どっちか一つしか実験できない。

朝永　壁に二つ孔があいている。光の波がこっちから来るという場合（手振りで示す）電子を孔のところで捕えて実験すればいいが、そういう実験をやらず、電子を捕えてみない場合に、片方だけから来たと考えることはいけない。その場合に、量子論では両方の孔を電子の確率振幅が抜けているという記述をする。

三宅　実際にはそういうことはない。

朝永　孔のところで捕えてみれば、両方をぬけるなどということは決して起らない。しかし、だからといって捕えないときにも一方しか通らないとは言えない。そう考えると干渉現象が説明されない。理論で電子の確率振幅が両方をぬけるということを翻訳すると、捕えないときに干渉を示すし、捕えるときには、あるときは一方の孔を、他のときは他方の孔を、そして実験を何回も同じ条件でくりかえすと半分半分の回数でそれが起るということになる。

渡辺　翻訳をやれば非常に間接的なんです。両方通ったということは実験できるかというと実験できない。もっと正確にいえば、「両方を通った」という命題をポジティブに実証する実験方法はない。実際に実験すれば必ず片方にしかあらわれないから。また逆にそのような実験をしない時、必ず一方しか通らないのだともいえない。翻訳の間に注意をもって翻訳しなければできない。それはそうとして数学が物的な現象に対応しているということは驚くべきことですね。ほとんど不思議というよりほか何ともいいようがないほどの事情ですね。

三宅　そこを理由のようなものを考えると、便宜主義ではいえない。コンヴェンショナリズムは間違いないと

ころでいっているので、危いところを逃げたということです。

下村 いま渡辺さんは、数学と事実のコレスポンデンスは不思議というか、驚くべきだといわれたが、それが実際西洋の知識哲学の出発点になった問題ですね。純粋な思惟によって経験から独立に証明されたものが実際に経験的事実と一致することの不思議さですね。ところでカントの認識論の場合は、数学と言ってもはなはだエレメンタリーな数学で、算術、幾何学の類いで、一応、それに対応する直観的な像をもちえた。しかし現代の場合には直接そういう直観像がない。コレスポンデンスと言っても直接の対応、像的な対応でなく、単に間接的な形式的な対応というほかありませんね。そこで端的な形で数学と事実とのコレスポンデンスの可能性ということが問題になりますね。その場合、物理学としてはただ実験的事実を数学的に表現できさえすればいいわけですが、しかしそのようなことがいかにして可能になるか、その可能性の根拠ということは認識論の重要な問題ですね。

三宅 マッハなどの場合は、理論的なものはコンヴェンショナルなものだ。アトムのようなものもそういうようにみていたのに、その後の情勢はむしろそういうようなものがあるという方に進んでいることからみますと……。数学の形態が変っていわば表現の能力が進んでゆく。一方では現象の実験的な分析が進んでゆく、そうして両方から近よってゆく。とにかくああいう微細なところに成り立つ過程が合理的に認められたということは、合理的なものがあそこまで浸潤したわけですね。

渡辺 こういうことはいえるだろうと思います。数学は、科学的にいえば、数十万年またはそれ以上の進化の歴史で、物質の側からそういう思想の型を教えられてきた、それが人間の頭の中に出来ている、そう考えるよりほかないのじゃないか。どうして物と心がよく一致するかということは、発生的な由来を科学的に客観化してみれば、そういうことになる。

三宅　数学は進化した人間の頭から出てきたということにすれば、そういうことになるが……。

渡辺　そうでしょう。

三宅　しかしそれはそうじゃない、経験……。

渡辺　もちろん個々の生物の経験や誕生後の教育からも取入れていると思いますが、アポステリオリなものはわれわれ個々の人間の代になって加えられるもので、人間の思考の能力や形式においてはきわめてわずかな付加物であって、大部分の根本的なものはずっと古く生物の進化史を通じて、思考の形式の原型というものは出てきたと思う。

三宅　あとになって出てきたものも、いわばそこまで行って、それがわかったという……。

渡辺　数学の根拠になっている無矛盾性というものはよほど長い年月がたたなければ、動物の頭に出てこないと思う。それは広い意味で自然の側から教えられたんだと思う。

下村　その場合に、渡辺さん、数学と事実との一致だとか対応だとかいうことが、素朴に事実として認められているだけですね。しかし数学的思惟の本能が反省されてきて、それがアプリオリに思惟によって形成されるものであることが自覚されると、そのような数学と経験的事実とが一致するということが単に事実だというだけですまない問題になる。そのまま素朴には認められない。

渡辺　もちろんそうです。

下村　この一致することの基礎づけは、渡辺さんの言われるように単にいままで人間の考え方だとか習慣だとかいうことではすまないですね。いままで素朴に一致していると考えられていた。しかし数学がよってもって成立している根拠というものを考えれば、必ずしもただちに一致するものとはいわれない。それにもかかわらず、

とにかく現に一致している、対応している。そこでその対応の根拠というものが考えられねばならないというのですね。

渡辺 発生的・進化的な面から、すなわち外側からいえば、僕のいったようなことになる。

下村 そういう進化的な理由づけでは、そういう基礎づけはできない。

渡辺 「基礎づけ」といえばいろいろな意味があるが、発生的な由来についていえばそういうことになる。将来経験が進むに従って、数学の基礎が広まって、アリストテレスの論理が量子論理や、多値論理に変って行くというようなことがありうると思うが。

下村 違っているにかかわらず対応している、そういうこととの基礎づけは、単に進化というようなことでは基礎づけられない。

渡辺 どういう種類の基礎づけを要求しているのですか。

下村 本来性質の異なっているものが、異なっているにかかわらず一致していることとの理論的・論理的基礎づけです。あなたのいわれるのは、単にこれを人間の発展の結果だといわれるが……。

渡辺 私が今までいったのは人間を外から見る科学的な立場からですよ。科学というのは全部を客観した立場です。

三宅 しかし進化ということが科学では未解決じゃないか。特に精神の発達まで入れてくると実証の範囲をこえてしまうでしょうね。

渡辺 大体の方針ではそういうことだろうと思います。ところで立場を一転して人間の主体的の問題としてこれを見直せば話はもちろん別である。主体としては今まで私が外から教えられたといったものが逆に根源的に与

えられたものと考えられるべきだと思います。数学を成立させるためにも、無矛盾性の要請を絶対的範疇として与えられたものとして考えなければならない。主体的な人間として、根源的に与えられたものとして、それを出発点としてそれで考えなければならぬから、そういう場合には、逆にそれらの根源的な形式の統一作用で経験を成立させている、というよりしかたがない。この見方でいえば外のものが逆に内なる枠によって経験となりうることになる。そして両方の見方が成立してよい。

下村　そういう意味の進化ということだけではこの基礎づけはできないと思いますね。

渡辺　すべてのものを自然科学的に客体化してみることもできる。そういうことになれば一致のことも出てくる。もちろんその場合、生命というものの外界への適合、アジャストメントということを生体の特質として考える。外界に適合した範疇を持った生物は生き永らえる。

下村　客体としてみるということで、とにかく二つの本質の違ったものが、違っているにかかわらず一致していることの基礎づけができるというのは……。

渡辺　その基礎という意味は……。

下村　はっきりいえば、認識論的な基礎です。進化の結果の事実だという単にそれだけでは偶然というほかないでしょう。

渡辺　進化という見地からならば偶然ではないと思うんです。また認識論的な基礎づけとすれば、そういうわれわれのもっているものを普遍的な枠として、それに経験をあてはめて、経験を作るのだからしかたがない。当然一致するわけでしょう。

下村　そのあてはめるということの認識論的基礎ですがね。

渡辺　主観的立場からいえば自分のもっているものを枠として見たり考えたりしなければならない。

下村　どういうふうにですか。

渡辺　先験的（少なくともその個人について先験的）に与えられたものを、自己の原理とするよりしようがない。それに一致するということは不思議とはいえない。すべてをその型に入れて見ているのですから。

下村　問題はその仕方の根拠ですね。源泉の違うにもかかわらず一致しているということの根拠、あるいは一致させうる根拠ですね。

渡辺　一致しているということは、一致させるように見ているとしかいえない。

下村　その一致させるということの基礎なのですがね。違った立場のものを一つに一致させるということがどうして可能になるかというのですが……。

渡辺　一致させるようにはめ込んだのだから一致するよりほかはない。

下村　はめ込んでいくというのはどういうことですか。

渡辺　その「はめ込み」の成功する理由は外から見ればさっきの進化的説明となる。

朝永　はめ込んでもはまらない、なぜはまらないかということですがね。

渡辺　一つの比喩でいえば、水泳の成功のようなものでしょう。泳法を知らないで水にはいれば溺れるはずだが、泳法は水にはいってからでなければ学ぶことができない。水泳は水から教えられるが、泳ぐのは人間が主体的に泳ぐからです。この問題は根本的には一番最初私のいったところの「純粋経験」に戻らなければならない。人々は初めから「心」と「物」とを対立させて、その一致をあらためて問題とするが、本当の順序は逆で、一致した「純粋経験」を「心」と「物」に分極させるのだ。これは「生命がある」ということで根本的に保証されて

いると思う。

下村　それだけでは依然として問題は残っていますね。

物質と生命

三宅　話がまえにもどりますが、物理的な過程をみてゆく場合に、ある物理的な現象が、オルガニズムのようなものになっているということは、それが与えられた時には、それをそういうふうにつなぎ合せる作用というものは、物理学の立場としては物理的な作用とみるのでしょうね。しかしいま仮りにオルガニズムというような特別なものがなくなっても物理の法則はかまわないわけでしょう。

朝永　それはどういう意味ですか。

三宅　オルガニズムというものが成り立っているとして、それを分析して要素的な過程をとり出してくれば、それを規定する物理学的法則はあるわけでしょう。オルガニズムは現実の世界にはあるけれども、物理的法則だけからいうとそういうものがなくたってかまわないのじゃないか。オルガニズムがあるということは、一つの特異的な事実として物理学は認めるが、それを成り立たせる原理は物理学の法則では出ないのじゃないか。

朝永　オルガニズムがあるということは、物理学から出てこないのではないかということですか。

三宅　そういってもよいでしょう。現実に自然界にそれがあるとすれば、実験なんかしてその現象の過程的なカラクリを物理化学的に説明できるでしょうが、なくても物理の法則はかまわないわけでしょうね。

朝永　オルガニズムがなくてもかまわないというのは……。

三宅　物理の法則の中で、ある一種の法則は、物理の中で必然的に導き出せるというようなものでしょう。た

とえば結晶の場合はそれがあるでしょう。オルガニズムの場合にもそれと同じようにいえるかどうか。

朝永　結晶の場合には、物理の法則からアトムが集まって、ああいう結晶を作るはずだということになっている。それが有機体の場合……。

三宅　アトムが集まって、細胞みたいなものができる場合と結晶の場合と原理的なちがいがあるかどうかですね。

朝永　蛋白質など、ある数の炭素とか窒素とか、そういうものが集まると、蛋白質が出来る法則ということが、物理学から結論されるかというのですか。

三宅　その構造がすでに出来た範囲では、それが集まればこうなるといえるでしょう。しかし生物の場合は、集まるといってもその集まり方が特別なものなのでしょう。そういうものが出てくるということは、物理学プロパーの立場では偶然的なことで、そのことが起らなくても、物理学の一般法則というものはいいわけでしょうね。

朝永　それは物理学に聞かないとわからない。

渡辺　それはさっき僕の……。

三宅　渡辺さんはフランス通だからフランス哲学のような考え方で話して下さるといいんですがね。一足とびに宇宙論的なことをいわれると困るのでね。

渡辺　いまいわれたことについて、二つの意味で、「生命」または人間の存在を物理法則と切り離すことはできないと思います。一つの意味は自然科学というものは結局人間が作ったものだということですね。これは当然だ。人間がなければ自然科学はない。もう一つの意味は、自然科学の立場でいえば現在の基礎法則があって、なおかつ宇宙のあるイニシアル・コンディション（原初的状態）が与えられたならば、ある時期で必然的にある分

子と分子とが結合して、一つの蛋白質を作ったり、あるいは原始的生命のようなものが出てくるということがあるはずです。それがだんだん複雑なものに変ってゆくだろうということは、物質的な法則の中に含まれていると考えるのじゃないのですか。

三宅　イニシアル・コンディションが、生物を生じないようなものであったところで物理学の法則は成り立つということは考えられますか。

渡辺　それは考えるだけのことですね。

三宅　考えるだけのことでもよろしいが、生物の現象——進化もそうですが、個体発生でも——が、過程として単にメカニカルなものだかどうかは大きな問題ですが、それはそれとして、イニシアル・コンディションが違っていて、無生物のような世界しか出てこないようなイニシアル・コンディションであったとした場合、どうして出来たかは別として、とにかく物理学が出来たとして、物理学の法則はすべてそこで成り立つかどうか。

渡辺　別のところから援軍を引張ってくるので申しわけないが、物理学には都合のいい法則があって、すなわちエルゴーデンザッツというものがあって、どんなイニシアル・コンディションから出発しても十分時間がたつと、他のイニシアル・コンディションから出発したものと、非常に似たものとなるということがいえる。そうすれば、どんなイニシアル・コンディションで始めても、現在の宇宙と同じようなものがある時期に生じるはずです。

三宅　しかしそれはある限られた領域でのことでしょう。

渡辺　現在厳密には力学の現象についてしか証明されていないのでしょうが、一般化されると考えられていま

三宅　一般化されるか、されないか知らないが、それを宇宙にあてはめるのは大へんな飛躍ですね。

朝永　今の物理学がですか。

三宅　今の物理学です。

渡辺　エルゴーデンザッツというものは、すべてのものに成り立つべきものと考えるべきものじゃないですかね。

三宅　力学的な体系でいえたから他の領域にも適用できるということはすぐには言えないでしょう。そう言い切ることは大きな形而上学的断定になるのですから。

渡辺　私は生物、特に生命の方を尊重するのですけれども、物理学者としていえば、エルゴーデンザッツというものは、すべてを支配しなければならぬと思う。そうすると、現実に生物があるということからして、物的なものから生命的なものが生れ出るということが一般的に含意されておらねばならないと解釈しなければならないと思います。

三宅　つまり生物において、物理化学的なタイプの過程に対して、コンティンジェント（偶然的）なものがあるかということ。

渡辺　コンティンジェントでない、と思うんです。ニュートンは力学上のイニシアル・コンディションをコンティンジェントと考えた。ニュートンは、引力の法則は任意性のないものであるけれども、地球がこの半径の軌道にある、火星がこの半径の軌道にあるということは任意なもので、それは神様がその軌道の中に入れたのだと書いた。しかし少し考えれば、それは太陽系成立の時に力学的・必然的に定った、と考えるべきであるのはいうまでもありません。さらに十九世紀から二十世紀にエルゴーデンザッツが発達してみると、あらゆる可能なるイ

ニシアル・コンディションから出発しても、長い時間がたてば、すべては同じことになってしまうということになっている。

三宅　その力学的命題にそういうメタフィジカルな解釈がありえようとは思わないですね。

渡辺　だから物理学者、力学者はエルゴーデンザッツをいう。うるさくいうのでしょう。

三宅　それが証明されるのはどういう現象についてですか。

渡辺　とりあえず力学系です。

三宅　だからそれだけではどうもね。

渡辺　力学系が証明されると、同様な方法で電磁気にも拡張される。そしてあとはやさしいと思います。量子力学にもエルゴーデンザッツが成立します。ただし量子論の観測の理論から見直すと、エルゴーデンザッツはもっと微妙な問題に触れてきます。

三宅　物理の範囲でしょうね。あとはすぐできるというなら私の問いに対する一つの断定的な答ですね。

渡辺　そういうことからいったら、生命は物質から当然出来てくることになりましょう。それは生命の尊厳さをきずつけない。また生命の意義ということとは別問題です。

三宅　問題がずれて、話がそれてしまったね（笑）。

朝永　物理学者は、オルガニズムも物理学の法則から出てくるだろうという考えで努力するでしょう。誰も確信はない。失敗したとしても、転んでもただは起きないで行くという点で、確信はなくても努力する。

三宅　方法的な立場としてはそうでしょう。しかしコンティンジェンスを認めたって、物理学が価値を失うということはないと思う。

渡辺　物質の座談会がえらい話になりましたね（笑）。

客体について

三宅　下村さん、ベルグソンは物理学的な物質を知性の構成物だといっていますが、ベルグソンのものをみると、もっと違った意味の物質を考えている。物質というものが生命の躍進に対する抵抗とか、あるいは緊張に対する弛緩とかというようなことですね。ベルグソンとしては、そういうものがなければいまのような進化はない。オルガニズムというのは、そういう抵抗する物質の上に生命が刻みつけたものだというのだから、そういう物質がなければ刻みつけることはできない。いわば生命の躍進に抵抗する力としての物質、あるいは物質性というものをリアルなものとして、ベルグソンは認めているのだと思いますが。

下村　物理学でいう物質とは非常に違ったものでしょうね。しかし全然別ものとはいえない。つまりそれの一つの物理学的構成ということでしょうね。

三宅　そういうものをわれわれが処理しうるような形にすれば、物理学的な物質になるわけですね。そういう形で処理するにしても、処理されるマテリアリティのようなものがあるが……。

下村　そういうマテリアリティというものは人間をも包んだようなもので、人間の単に客体というようなものではないでしょうね。

三宅　ベルグソンは物質ということをいった場合に、一方ではそういうことをいい、一方ではアーティフィシャル（作為的）なものだといっているが、自分のシステムの根本に考えられている物質というものをはっきり問題にするということをしていないと思う。

下村　ベルグソンもフランス哲学の伝統的な二元論が基礎にありますね。二元性を統一するとか、統一者というようなものを考えないで……。

三宅　統一は考えないでも、自分がそれをエセンシャルなものとして認めているということをはっきりさせ、そのマターを生命力と同じく基本的としているという点を突込んでゆかなければならない。ベルグソンにおいて、そういう意味で物質的なもののリアリティということが考えうるのじゃないか。客体となるならないという問題ですが、意識と物質と対立的な二元にしてしまえば生命の立場はおそらくなくなるでしょう。だからベルグソンでも生命を考えるときには、ダイナミックな抵抗する力としてみている。生物体は客体であるが、生命の過程そのものは内省された体験の構造を入れこんでみなければ理解できないところがある。少し話が前後しますが、実験は合理化のための操作ともみられる。ところで実験では何かの見当をつけてやって、ものを引張り出す。引張り出すときにすでに合理的に取扱えるような仕方で引張り出すが、出てきたものがどうなるかは、出てきたものに従うほかない。法則性という意味でなしに、独立性という意味での客観ですね。

朝永　向うは向うで、こっちとは別ということですか。

三宅　まあそうです。こっちの合理性を全く受入れない形ではないかもしれないが、とにかく所与的なものですね。

下村　実験で「引張り出す」ということが問題になるわけですが、引張り出すものは主観なのですが、物理学は客観化する立場だからこれをも客観的な物と物との関係として見ようとする。ところが原子物理学の実験の場合にはこういう考え方、あるいは方法の限界というか、制限というか、そういうものが現われてくる。それがさっきいわれた原子物理学において、われわれの自然認識の構造の原型を反省せしめる、そういう点がはっきり出

てきたといえるのではないか。そういうことを不確定性原理において問題にすると、物理学者には評判が悪いが、しかしそれは物理学者には哲学で言う「主観」の意味が十分理解されていないからだと思う……。

三宅 主観といっても、観測をする主観であって、ものを引張り出せるような装置で、それを媒介としてしか引張り出せないので、物理的なものに従って考察しなければ、われわれがやたらな実験装置をしても何も出てこない。

因果律について

渡辺 不確定性原理の問題では、私は一番最初にいったことが関係してくると思う。不確定性原理が出てきたから、すなわち原理的に因果的でないものが出てきたから、因果律が破られたという考え方――その考え方に対していろいろな逃げ方がある。私は一つだけ正しい逃げ方があると思う。やはり不確定なものを避けようとすると、観測者と被観測物の両方を客体化する第三者が必要になる。そして不確定なものを全部避けようと思えば、全体、すべての宇宙というものを「もの」とみた時にだけ確立すると思う。そういう「もの」をもってこなければならない。しかしすでにそうなっている時には「もの」ではなくなっていると思う。われわれの「もの」というものは人間に対する「もの」でなければいけないからです。

三宅 量子力学が出てくるにはオブザーヴァーをおいてやっているわけだ。全体になればオブザーヴァーも中に入ってしまう。

渡辺 全体ですから……。そういうことは一つの考えの上で作っているもので、実践的な意味のない概念です。しかしそれを考えること、それが一つの人間の宿命であるとも言えるかと思う。けれどもこんな人間に対しての

「もの」ではない。それを一足とびにもってきて、人間に対する「もの」のように考えて、今度は決定論者がいうようにわれわれに対する物質というものに対しても、すべて因果律が厳格に成立しているとか、われわれに対する物質に因果的な決定的なものがあるとか、いう考え方は間違っていると思う。われわれに対して意味のある、すなわち行動の対象としての物質、主体に対する客体という立場に立つ限り、機械的な因果律が破られたものであると思う。そういう意味で、十九世紀の物理が行き詰って、不確定性原理が出てきたということは、新しい観点の必要をはっきり示していると思う。物質をどうみるか、いままでのように人間を離れたものとしてみることはできない。すべて人間との相関関係にあるもので、それを観測者と被観測者とに分ける。そこに必ず不確定が出てくる。

朝永　いままではできたんですか。

渡辺　いままでもできなかった。できないものを分けて考えた。

朝永　いままでできたと考えたのは……。

渡辺　いままでの場合、古典物理の範囲はそういうふうにやって因果律が成立していたわけでしょう。

朝永　そうすると因果律が成立するとしないとが、分けられると分けられないとの条件になるというのですか。因果律というものがそんなに大事ですか。

渡辺　物理学者は大事にしていると思う。それが有限な対象に対して破られているということは、はっきりとして、量子論の一大発見です。

朝永　それはそうですが、量子力学で因果律が成立しなくなったのは観測結果の間だけの話であって、だからといってそれを救おうと思わないでもいいではないですか。

渡辺　むしろ救おうとしないで、厳格な因果律はないというのです。
朝永　因果律がないというが、それは観測結果の間の話だ。
渡辺　観測結果が一番大切です。因果律のこれまでの方式は棄てなくてはならないというのです。しかしある形では必要なんでしょうが、その程度には量子力学では成立している。統計的にはね。
朝永　統計的にせよ何にせよ、成立しているその世界を物理学的の自然だと思えないのですか。
渡辺　個々の実験結果を翻訳する時に統計という言葉を使わなければならないことになりますね。
朝永　統計的な言葉を使わねばならなくても、それは、物理的世界に人間的な意味を与えるために翻訳するときの話で、それを避けることはできもしないし必要もない。そのことにそうあわてなくてもいい。
渡辺　それはあわてない。
朝永　このことをそのままに受入れられないですか。
渡辺　受入れますけれども……。
朝永　ある波長の時は赤いのだということと同じように、そのまま受入れられないものかしら。
渡辺　それは違うでしょう。
朝永　実験を繰返せばある結果が出る。それが統計的であろうと理論の結論を現実に翻訳する筋道が与えられれば、そのまま受入れればいいのではないか。ある波長の光が赤いのだといえば、それを受入れるよりしようがないでしょう。
渡辺　その場合は実験の結果も一義的に対応するから今の場合とは違う。
朝永　それは形の上で違うが、なぜ違っているかということは、少なくとも物理学者としては問題にしない。

渡辺　問題にしないが、世間を騒がして問題になった時に、それに対してある一つの答をしなければいけないでしょう。

朝永　その答はしなければならないかもしれぬが、私なら答えられないと答える。その答の仕方に、宇宙全体のシステムというものをもってきて、それで答になってますか。

渡辺　答になっていない。それを私はまさに排撃するわけなのです。昔流の因果律（観測結果間の）を保持するには全宇宙にもって行くことになり、それは科学でなくなる。それともう一つの逃げ方は、無限個の電子を用意する。そうすれば、何パーセントはどうなっているということは厳格に決定論的にいえる。波動関数というものに対して現実的な対応物を作ろうとすると無限個……。

朝永　何回もやるということをそんなにまでして一度ですまさないでも……。

渡辺　そうすれば対応性が一対一になる。

朝永　無限個というのは……。

渡辺　無限個を必要とするから再び物理的でなくなる。僕の答えるのは、狭い意味の因果律というものは破れたということを率直に認める。それに対して多くの実在論者が何かの形で救おうとするわけです。

朝永　しかし救わないでもいいと考える人もいる……。

渡辺　救い方はすべて科学の外に出てしまう。因果律的な考え方、合理的に必然的にものを見ようとする考え方は人間がもって生れているから、一朝一夕に棄てられないから、それを明らかにするために僕は全宇宙ならば因果律は成り立つといってやる。そしてただしこの全宇宙は空想上のことで、これは物理的な領域ではないというう。したがって因果律を厳格に保持しようとすれば科学でなくなると僕はいうのです。

朝永　どうもそのおしまいの言葉が聞えなくなってしまうのでね（笑）。

渡辺　むしろ逆に一番おしまいのことだけいうから皆さんに叱られる（笑）。

下村　全宇宙をもち出すのも一つの方法かもしれないが、そのような大仰のことをしなくても考え方があるように思いますが。因果律は古典物理学では成り立っていたが量子論においては成り立たないという理由は不確定性によるわけですか……。

渡辺　理由というより……。

朝永　それは理由ではない。同じものを言いかえたのです。

下村　不確定性原理が成り立っているということが、因果律が成り立たないということなんですね。それが古典物理学の場合には成り立っていたということは、つまり不確定性がないことですね。このことは観測の装置と観測の対象とがはっきりと分離、区別できるという建前においてですね。

朝永　できるという建前において、成り立っていたというと……。

渡辺　それでいいのじゃないか。

下村　ところで原子物理学が自然認識の原型だといわれる立場からすると、実は古典物理学においても、実際は分離できないのだというべきですね。

朝永　量子力学の中における古典物理論が成り立つような現象においてといえばいい。

下村　古典理論が成り立つ立場は、つまり不確定性原理がネグリジブルな場合で、観測する装置と、観測される客体とが一応分離できるということですね。ところが実はそれが厳密には分離できないのだということですね。というふうに考えて、ところで分離できるということは、どういう意味かというと、観測の装置が観測される対

象を攪乱することなく観測することができるということですね。

朝永　そういえます。

下村　ところで「観測する」ということを分析すれば、一般に「見る」ということとの分析ですが、実際「見る」ということはもちろん眼で見るわけですが、この眼で見るということと、原子物理学で一定の装置で見るということとは、原理的には違わない。眼で見る場合にも眼だけではなく、光がなければならない。顕微鏡がなければ小さなものは見られない。しかし、といっても顕微鏡が見ているわけではない。顕微鏡で見ているのである。眼で見ているといっても、眼が見ているわけではない。これは原理的には同じですね。だから単に見るということも単に意識だけの立場でできているわけではない。つまり眼という一つの物をオルガンとして見ているわけですね。むしろもっと端的に言えば、眼や光等々をオルガンにすることが見ることであると言える。この場合、観測の装置と観測の対象とは必ずしもはっきりと分離できるとは言えない。その点では原子物理学の場合と原理的にはそんなに違っていないと一応考えられないかと思うのですね。それにもかかわらず、見ることがあたかも対象から離れて、単に意識において可能であるかの如く考えたのが古典的物理学の立場だと言えませんか。そういう意味で、肉眼で見る場合と顕微鏡で見る場合とは原理的には同じ構造のもので、認識の主観になるものは、つまり肉眼をオルガンとするオルガニズムと、顕微鏡をオルガンとするオルガニズムとの違いにすぎない。その場合、眼にせよ顕微鏡にせよ、それ自身として見れば物体で、眼や顕微鏡が見るわけではない。これがオルガンとして主体化されるところに見るという作用が成立することになる。だから不確定性関係を単に観測装置とその対象との純粋に客観的な物と物との関係だという科学者の解釈は、観測装置が観測の対象と区別されて、特に観測装置と言われる意味を全く抽象してしまっている。認識論的な問題の意味が理解されていない。この関係をもっ

とつきつめて言えば、われわれの認識においては主体と客体とは対立しながら結びついていること、われわれの認識はこれを能う限り対象化、客観化すること、つまり遮断することだということができる。それが古典的物理学の場合には原理的には一応決定的に可能であると考えられていた。しかし原子物理学においてそれが原理的に制限があることが明らかになった。そういうふうに考えていけば、宇宙論まで出さなくても、因果律の問題も一応考えられるのではありませんか。因果律も要するにこの客観化と相関的に考えられるものだというふうに。

渡辺 そのとおりですが、主体と客体というものが一体をなしていて、その境は決められないと同時に、またどこかに作らなければ話ができないということが大切です。そういう意味では同感です。ただ不確定性原理のいってることは、不確定性原理のハイゼンベルクの思考実験による証明法においては、むしろ不確定性原理を決定論的な立場から説明したようなものです。観測している人と、観測されているものとを、第三者が見て話をしているというようなものです。そういうふうにして第三者の見ていることにも実験操作の間に不確定が生じる、その不確定について第四者が語る、そういうふうにして順ぐりに追って行く、第四者が必要になってくるかも知れない。それを決定するためには第五者が要る。それを全部塗りつぶすためには人間の外に出なければならない。

下村 人間の外に出なくても、人間の立場がいえる。もっとも物理的人間でなく、主体的な人間ですけれども。

社会について

渡辺 そういう人間でも、そうした時には現実に観測されるものは不確定といわざるをえない。もう一つ関連があるのは――脱線しますが――社会的な決定論です。それも全く同じ関係だ。自分（または自分たち）を社会から切り抜いて、社会を自分に対する対象にするとすれば不確定です。社会的な決定論を強引に主張しようとす

る人は、結局社会全体をみることになる。そんな社会は人間でない人間から見た仮想的な社会です。それはいわば神の立場で人間の社会科学の立場でない。

下村　社会が自然と区別される限りは、単に社会の決定論は考えられない。それはとにかく自由な主体としての人間をメンバーとするからです。

渡辺　社会の動向が原理的に決定か不決定かという議論です。主体的な人間に対する社会は自分というものを社会から切り抜いて、それから残りについて語るべきである。そういう社会はプラスチックで不決定だと思う。そうでなければ社会に対してのわれわれの働きかけに意味がなくなる。それに対して社会が決定的だということをいう場合は、すべての人間を客観する第三者的な立場ではじめていえるわけだ。

下村　社会を決定的なものとみる立場は、社会を自然としてみる立場ではありませんか。

渡辺　それは人間の立場ではない。

下村　そうすれば自然と社会の区別はなくなってしまう。

渡辺　自然でも社会でも全部を客観化するということはできない相談である。

下村　自然でない社会がある。

渡辺　自然でない社会とは。

下村　われわれがその中で生きてこれを動かしているものが社会です。とにかく自由な行為の可能な主体としての人間が形成するものが社会ですから、社会を決定的とみる限りは社会を自然とみていることですね。自然と社会が区別される限りは社会は自由な行動の主体としての人間を要素にするものですね。

渡辺　自然もそうだと思う。物理的自然もそういうものだと思う。

下村　自然科学で考える自然はそういうものでない。
渡辺　私は自然もそうだと思います。というのは……。
下村　哲学の立場で反省してみればそうだといえるという意味でしょう。
渡辺　本来の立場はそうであるべきだと思います。自分だけ切り抜いたものについて語っている。いつでもそういうものであるべきであった。それと全体と区別がつかなかった。それが十九世紀で、二十世紀はそれをはっきり教えている。
下村　社会科学でも、従来社会の法則と自然の法則とを同一の法則だと考えていたのが、はっきり区別されるところに十九世紀の歴史的・社会的科学の成立になるということができる。
渡辺　原理的に深めてみると、自然といっても社会といっても、常に自分を切り抜いた残りについて語るべきものだ。そういう意味において社会も不決定、自然も不決定だと思う。
下村　人間を抜くということになると、抜き方が違っているところに問題があるでしょう。
渡辺　社会の場合にはむしろいわゆる上部構造的なインターラクションを考えている。物的対象の場合には物的インターラクションを考えている。決定論、不決定論は、部分と全体との関係の正しい認識によって理解される。二十世紀の物質は実は観測者に対する物質というものであるべきだということを教えている。それを改めて教えていると私は見る。
下村　渡辺さんのお考えでは二十世紀にあっては物理学も原理的には社会と同じようなものになっているというのですか。
渡辺　僕のみるところではそういうことです。もちろん今言った限りの意味でですが。

下村　もう一つ先へ進めて言えば、自然というものも独立の自然ではない。さらにもう一つ進んで言えば、主観と客観、主体と客体とが対立しながら一つであるということになるのですか。

渡辺　そうです。

科学と哲学

三宅　ハイセンベルクは実証論的に考えようとしたが、あとではそういうことだけではいけないことがわかったというようなことを湯川氏がいっていたと思うが、あれはどういう意味でしょうかね。

朝永　ハイゼンベルクは、観測可能なものだけで、量子力学を作り上げねばいけないと初めに主張した。それが実証論的だといわれたわけでしょう。しかし彼は原理的にという言葉をつけて「原理的に観測可能な」といっている点を注意しないといけない。ハイゼンベルクの意図は昔の量子力学の欠陥をああいう言葉で端的にいい表わしたのです。例えば昔の量子力学では電子の軌道運動の周期が理論の中に出てくるが、これはその電子の出す光の周期と違う。軌道運動の周期は出てくる光の周期とは何の関係もないから、それを観測することは原理的にできない、これが昔の量子力学の理論の構造です。ところで、そういう観測されることを理論自身が否定しているようなものが理論の中で基本的な役割をしているのは理論が悪いということを意味する。その点をハイゼンベルクは強調したのです。理論自身によって観測できないと結論されるものが、その理論の中で基本的な役割をしているということはいけないということですね。こういう例は他にもあります。例えばエーテルもそうで、アインシュタイン以前の理論では理論の基礎に動かないエーテルというものを仮定しながら、エーテルの運動は実験にかからないという結論が出た。そういう意味でエーテルは否定された。それと同じようなことがハイゼンベル

クの言葉の中に意味されていると思う。ああいう理論が駄目になる段階で、一番確かなものに頼って理論を作ろうとすることは試みとしては成り立ちうることだと思う。

渡辺 過去のイドラを破壊する方法の一つとして、もう少し確実に実験のかかるものに一回戻って、そうしてまた体系を作り直そう。作り直したものに新しいイドラが知らないうちに入っているのでしょうが、そのイドラを破壊する時にはまた新しく実証的なものを手がかりにしていく――というようにね。

三宅 そういう考えはやはり広い意味で実証主義的といってもいい。ものの考え方がそういうふうにクリティカルになっているということは、われわれにとって教えられることになるわけです。例えば物理学者がものに当って実際に厳密にやって理論の立て方を反省したところは、哲学者はそれをありがたく受けなければならないと思うのです。私は新しい物理学は教訓的だと思います。ところで量子力学という段階まではひとまずしめくくりがついたが、その後の素粒子論なんかではまだゴタゴタしているらしいですが、それがしめくくりがつくような場合、哲学に響いてくるようなことがありそうですが。

渡辺 その新しいゴタゴタの解決のためにハイゼンベルクは再び実証的なものにもう一回戻ろうじゃないか、直接観測されるものだけに頼ろうということをいっている。

朝永 しかしそうではないようなこともいっている。

渡辺 自然科学者はずるい。いろいろなことをいっているのを、いちいち本気に取上げるとえらいことになる。

三宅 いま作りつつあるのだから、哲学者立入るべからず――という立札を立てておかなければならないとエディントンがどこかで言っていましたね。出来つつある場合には、われわれはあまりいわぬ方がいい。しかし危機を経るということは偶像をとりこわすという意味で哲学にもありがたいことです。

朝永　それはそうです。人間というものはそれで啓蒙されていく。ただ理論を作り上げていく途中では、つじつまのあうような想像ができれば、それがどういう道を通って出てきても、途中が間違っても、いっこうそれは意に介しないというように物理学者は思っているのじゃないか。

三宅　科学で一つの正当な飛躍ができる時は、あとから考えると哲学的な概念というもの自身が建て直されるというふうになっている。

渡辺　主として結果として出てくるということですね。

三宅　哲学的なものはただ結果ではない。科学の新しい理論がたてられるとき、暗黙の中にそういうものが物理学者の頭の中に動いていて、それが結果を出すのですね。

渡辺　哲学的であろうとすると、一つの原理をまず立てて、それから導き出してこようという立場になる傾向をまぬかれない。少なくとも全体の体系または見方が固定しやすい。自然科学者はいろいろなことを言ってみるし、いろいろなハイポセシス（仮設）を立ててみるが、結局実験が先であとで理論が出てくる。それだけ向きが違う。だから途中で自然科学者がいちいちいうのを、それが原理的だと思うのはいけない。

三宅　はじめに原理をたててそれから導き出すのが必ずしも哲学のやり方ではない。経験科学から学ぶということが大切でしょうね。哲学者は、物理学者が相当しっかりしたところに出た時は、それの理論的道筋を反省的に考えてもいいわけではないか。両方で嫌いあうことはない。それがどうも何か領域をおかすようなことになりがちで……。

朝永　ということでなく、哲学の勉強するよりも実験した方が早いということがいえる。

三宅　そうですね。

朝永　そういう意味で哲学者が何かいっても物理学者は聞こうとしない。哲学者より自然自体に聞けということですね。決して悪意じゃない。

三宅　それは変に聞いてもらうより聞かぬ方がいいのです（笑）。哲学というものが何というか、大胆なこと、決まってないことを決まったようにいう癖がある。日本人は気短かでそういう傾向が強い。しかし実証性のない理論では駄目です。ものに突き当って学ぶ、それが経験です。われわれの哲学はもっと経験的・分析的にならなければいけない。その点、経験科学、特に新しい物理学のやり方がわれわれに教えるところが多いと思うのです。今日物理学の方にいろいろおききしたのもまあそんなつもりです。

（『物質とは何か』（アテネ文庫）、一九四九年）

座談　科学と方法

朝永振一郎
田　宮　博
伏見康治
坂　田　昌　一

伏見　今日は、物理屋さんに、しかもよく似た理論物理屋さんが集まってるところへ、田宮先生という異分子がひとりはいって、心細いようにおみうけしますので……、これは田宮先生をいじめる会ではないということを、あらかじめ申しあげておきたいのですが……。

田宮　あとがこわいですね。

伏見　じつはこのあいだ逆な会があったのです。物理学関係はわたくし一人で、あとは生物学関係で、バカげた質問をしてもいいというので恥をしのんでやったわけです。――物理の先生が学校の子供にエネルギーの原理を教えるときの話です。重たいものをもって立っているときに、力学的な仕事をしないのに、疲れてくるのはどういうわけだ――という疑問に物理学者は答えられない。生物学の問題だと思うが、生物学者はどういうふうに説明してくださるのですか、といったわけです。ところがね、そういう場合に答えてくれたのは、純粋の生物学

者じゃなかったのですが、非常に概念的な説明をしてくださった。たとえば、こういうふうにいわれる——ここに水道のホースがある。水道のホースをピンとはって旗竿に使おうというばあいには、水を非常な勢いで流せばよい。このとき旗竿は仕事はしないんだけれども、水を流しているために、非常なエネルギーを使っているのだ。筋肉のばあいにも、それと同じことだ。——これは大ザッパな説明ですね。これなら、ぼくだってできると思うのですよ。問題はこういう説明がどこまで実証的に追及されてるかということですね。そのばあいの生物学者の返答はわたくしを満足させなかったので、ぼくは生物学者をうまくいじめてやったと思ったのです。それと同じ流儀で田宮先生、物理学者をいじめてほしいというわけなんですよ（笑）。それで、そういっても田宮先生は、すこし物理学者の方がおしゃべりしないと、なかなかきりこむ隙がないでしょうから。

朝永　隙がありすぎて、どこからきりこんでいいかわからない（笑）。

伏見　ここにいるのは、いわゆる理論物理学者なんです。世のなかのひとは自然科学者というと、まあガリレイいらい、実証科学ということを考えますからね。理論科学、純粋な理論物理学というものが成立するかどうかについて、ずいぶん疑問があるだろうと思うのですが、紙のうえの数式ばかり運転していて、自然現象がわかるものかどうかということは、田宮先生どうお考えになりますか。

歴史的考察があるか

田宮　生物学にもいろいろの分野がありますが、私などのやっている生理学ではおもに定常的な現象だけを取り扱います。例えば子供なら子供、大人なら大人の状態でどんなことが起っているかを研究するが、子供から大人への変化という問題には触れない。これを研究するのは発生学と言われています。生命というものの本質は生

成流転ということにあるのでしょうから、生理学などは一番生物学らしくない学問だと言えるかも知れません。ところで生物学の中で、なにが一番広い視野で生きものという対象をとり扱っているかと言うと、それは何といっても進化論でしょうね。進化論は時間的にも空間的にも、一番ひろく大きな場面をとり扱っているものですが、困ったことに物理学のように実験によって学説の良い悪いを検証することができないのです。生物の進化という現象がこの地球上でただ一回しか起らなかったものだからです。生理学では物理学と同様に実験によってものごとを実証していけるのですが、生物学が生物学らしくなるにつれて実証ということがむずかしくなり、だんだんものごとの「解釈」の学になっていくような気がします。この解釈は一種の理論にはちがいありませんが、物理学の理論とはよほどたちの違うものです。ところでこの進化論に相当するような問題が物理学にもあるのじゃないでしょうか。たとえば生物が発生する以前に無機物からどのようにして有機物が出来たかという問題や、太陽系や宇宙の生成、あるいは素粒子の生成などという問題はちょうど進化論にあたるものだと思いますが、いったいこの世に素粒子のようなものができるまえはどうだったのですか、何もなかったのか、それとも無限のはじめからあったのか、そういうふうな問題は物理学では考えられているのですか。

伏見　つまり田宮先生のおっしゃることは、物理学者というのは、現在の個々のものごとの間の総合的な関係の法則性を求めていると……。

田宮　そうそう。生物学における生理学のようなことだけをやっているように思えるのですが。

伏見　その上に歴史的起源をたどっていかなくちゃわからないことがある。物理学でも。原子の歴史性……そういったものが考えられはしないかというのですね。

坂田　ガモフの『太陽の誕生と死』はそういう歴史性を追求したものといえるのでしょうね。もっとも素粒子

よりまえというのはないわけですがね。

伏見　あれは原子核、ニュートロンから始まるのですから、始まりは素粒子といえば素粒子でしょうか。

朝永　エクスパンディング・ユニバース（ふくらむ宇宙）、ああいう理論のたてかたは必ずしも素粒子から始まるといえないんじゃないのですか。たとえばユニバーサル・コンスタント（普遍定数）がだんだん変わってくる、というような考え方ですね。

田宮　ディラックですか。

朝永　ディラックもそうですが、ヨルダンでしたか。ああいうひとたちは、ガモフなんかと全然ちがうわけですね。素粒子から宇宙を構成してゆくというのでなくて、もっと規模が雄大です。

田宮　生物学者の中にも生物学というものは現在ある生物だけについて、それが示す現象のカラクリを明らかにしていけばいいんだというひとがある。しかし大昔は生物がなかったことはたしかで、無生物から生物ができたことは誰しも認めないわけにはいかない。じゃ、どうしてできたかという疑問がすぐ起る。現代の生物学の根本理念とでもいうものは、「生命の神秘」を認めたり前提したりしないこと、生きものはどこまでも物質から出来ているもので、それが示す現象はすべて物質界を支配する法則で支配されていると決めてかかっていることです。それでは進化を物質的に説明できるかと反問されると生物学者ははたと当惑する。一つの逃げ路は現在の物理学に責任を転嫁することです。現在の物理学は簡単な物質系だけを研究の対象にしている。簡単な物質についてはいろいろ立派な法則を発見しているが、蛋白質のような巨大な複雑な分子のことに関してはまだほとんど何も知られていない。そういう物質の世界では現在の物理学がまだ知らない特殊な物理法則があるにちがいない。それが明らかにされた暁には生命現象を首尾一貫して物理的に説明できるようになるだろう。こういう考え方を

物理学者のシュレーディンガーなども書いていますが、わたくしももっともなことだと思います。

坂田　中間の段階の法則ですね。天体の運動とか、普通の大きさのものの運動はかなりよくわかっているでしょう。また原子や分子の世界のこともずいぶんよく研究されておりますね。ところが分子と普通の大きさのもののあいだの段階になお未知の法則性があるだろうというわけですね。

朝永　生物は物理の方へ逃げだすでしょう。物理学者の方へ責任を転嫁する。

田宮　まあそういうことです。

朝永　ところが物理学者は逃げるところがない。神様に逃げるのは卑怯でしょう。神様に逃げる人もあるんだけれども。

坂田　素粒子からさきとか、宇宙よりさきですね。ガモフにも問題はあるでしょうが、とにかく一応矛盾のない説明の可能性を与え、神様に逃げなくてもよいことを示しているわけですね。

生物が偶然できるか

田宮　生命の世界は実際不思議なことだらけです。あの小さいクモがどうしてあんな精巧な網目の巣を造るようになったのかを考えただけでも不思議です。原始的な生物はアミーバのようにただドロドロしただけのものだったのでしょうが、進化が進むにつれてたいていの動物は目というものをもつようになった。目が出来るについては最初表皮に何か感光性の物質が出来たのでしょうが、それだけでは目にならない。水晶体も虹彩も出来なくちゃならないし、他方脳には視覚中枢が出来、またそれと目とをつなぐ視神経が出来なければ高等な動物の視覚は完成しないのです。それらのものはそれぞれ精巧を極めた構造のものですが、それが歩調を合せて作り上げら

れていったということはいったいどういうことなのでしょう。スイスのギュイという学者がこういう計算をしています。今分子量二万くらいの蛋白質の分子を考える。分子量二万といえば蛋白質の中でもよほど簡単なものの方です。簡単のためにその分子は原子量がそれぞれ十くらいの二種類の原子から構成されているとし、その配列にはある程度の非対称性があるとする。そういうものが原子集団のケオスから、あらゆるコンビネーションの中から偶然できるプロバビリティを計算してみると、地球上の全アトムが機会をもつとして、十の二百何十乗年かかることになります。ところが地球の年齢は、たかだか二十億年、つまり十の九乗年でしょう。ですから単なる偶然では簡単な蛋白分子一個でさえもがとうてい出来るはずはないというのです。

伏見　単なる偶然でできたんじゃない。ばらばらのアトムの状態から多細胞の人間までという確率は非常に小さい。

田宮　われわれの体はわれわれの先祖の先祖のまた先祖の精虫と卵細胞があれば、それからの自己形成作用の繰り返しでできたのだといって片づけられますが、問題はそのままですね。どうして無機界から生物が産まれ、しかもそれが最初は簡単なものから次第に複雑なものになっていき、ある方向ではクモや蟻になり、ある方向では人間のようなものになっていったのか。ダーウィンの進化論は一種の偶然論ですが、そしてその点がわれわれにアピールするところですが、どうもそれだけでは納得できない何かがあるように思われるのです。

坂田　地球だけ考えるとそうですけれども、宇宙の中には地球みたいな天体がたくさんあるでしょう。しかも地球と同じような天体は現在の宇宙の中に無数に存在しているばかりでなく、過去においても宇宙の進化の歴史の中で無限にくりかえされて出現したのかも知れません。宇宙はちぢまったり大きくなったり、ちぢまったり大きくなったりして何度でも途中で現在と同じような状態をくりかえしたと見ることができるでしょう（笑）。

田宮　何かこの宇宙には非偶然的なものがあるということをもう少し物理学者に考えていただきたいと思うのですがね。

坂田　地球だけだと、たしかにたりないでしょう。チャンスは小さすぎる。現におこっているのは……。

伏見　さきほど地球の年齢が二十億年といわれましたが……、だいたい宇宙の年齢もそのオーダーですね。

田宮　ますます困りますね。

坂田　二十億年というのは、その前があったわけじゃないでしょうか。

伏見　その前は高密度な状態で生物的な環境が全然なかったわけでしょう。

坂田　それよりも前に、いまと同じような状態があったわけですね。

伏見　もしも振動する宇宙を考えればね。

坂田　いちばんちぢまった状態から何十億年かたってないかもしれませんけれども、それよりか前に、何度も……。

方向づけられた進化

田宮　進化論ではだいたい適応・淘汰・変異という三つのことがらで進化の現象を説明しているのです。ところがそれは進化のメカニズムの説明にはなっているが、進化の方向については何もいっていない。生物は簡単なものからだんだん複雑になっていったが、どうしてそういう傾向が出来たのか、その傾向を決めているのは何か、ということが問題です。生命現象の根底にどこまでも物質を考える人は物質そのものにその原因を求めるのですが、そうでない人は神様をもちだすことになるのです。

伏見　しかしどうですかね。田宮先生はシュレーディンガーをお読みになって統計的法則性が物理学の中心問題だとお考えのようですが、もっと昔に帰って物理学は力学がお手本だとしますと、力学は完全なる歴史性を追究したわけでしょう。

朝永　ええ、運動というものの……。

伏見　運動というものが直前の状態で決まるという意味で、完全なる歴史性を、Aの次にはB、Bの次にはCという完全な因果の連鎖を追究していったわけですね。統計力学的なものの考え方は十九世紀後半以後のもので、昔は完全なラプラス的の因果律を追究したわけじゃないでしょうかなあ。そこんところが物理学と統計と本質的になんかくっついているようにいわれたのが、もう少し分析してみないと、そう言いきれないんじゃないでしょうか。

観測者のありか

伏見　ラプラスの時代には機械的な因果律だったわけですね。十九世紀以後の気体運動論の発展、統計力学的立場の徹底を通して、量子力学の統計的解釈ができて、そのエレメントがなくなったようにみえるんですが、どこまでほんとですか。量子力学の統計的要素は観測を問題にするときはじめて現れるものですが、この観測というものを量子力学からとってしまったうえでは波動方程式だけですね。……この方程式に関する限りはものごとは因果律的に進展してるわけでしょう。

朝永　ですけれども観測を離れて、物理学というものはありえますか。つまり意味をもちますか。

伏見　その場合観測者というものを、客観の外においておけば、よろしいわけですけれどもね。全宇宙という

ものを包含するようなものを考えるとなると、われわれの精神そのものが客観のなかにあるとすると、その精神も波動関数で表わすとすれば、主観でなくなるわけでしょう。

朝永　ええ。

伏見　そうすると完全なるラプラス的因果律ですか。

朝永　全宇宙を包含したというときにですか。

伏見　ええ。

朝永　全宇宙を包含すると、ぼくはそのなかにはいるのですか。

伏見　もちろん朝永先生もはいるだろうと思いますが。

朝永　そうすると、僕も波動関数で支配されちゃってなんにものがいえなくなっちゃう。

坂田　そういう議論は昔からあるわけですけれども、波動関数で記述されるところの実体は必ずしも一重的なものじゃないでしょう。現代の原子論の特徴は物質の構成単位に分子・原子・原子核・素粒子といった種々な段階を見出したところにあると思うのです。つまり物質は累層的な構造をもってるわけですね。

伏見　累層的って、なんですか。

坂田　分子は原子からつくられ、原子は電子と原子核よりなり、原子核はさらに素粒子を構成単位としているというような構造です。このような構造はさらに大きい方向にも、また小さい方向にものびると思うのですが、量子力学でとり扱えるのは分子と素粒子の間だけだろうと思うのです。こういう事情を考えに入れると今の議論は変わってくるんじゃないでしょうか。

伏見　つまり、あらゆるものを包含したシステムを対象とするようには、量子力学はつくられたものではない

ということですか。

坂田　あるところからさきにゆくと、もはや量子力学の適用範囲からふみだしてしまう。かつてニュートン力学で宇宙の全部が記述されると考えたのがまちがいであったのと同じように、量子力学によって宇宙の全部が記述されるという考え方に、疑問の点があるのじゃないでしょうか。

朝永　もちろん疑問はあるけれども、伏見さんのいわれるのは、量子力学の立場でどうかというのでしょうね。

坂田　しかし量子力学をその適用限界の外にまで一般化していいかどうかですね。

朝永　いいとすれば、どうか。

田宮　それでだめだということになると、局外者のぼくなどには痛快ですがね。

坂田　はやくだめになることを、むしろ望んでいる。

伏見　いま若い連中が気負いたっているのは、いかにして量子力学をだめにするかというところで、気負いたっているのですよ。

田宮　量子力学をぶちこわそうという原子学者のみてる方向というのは、やはり微細の世界でしょう。わたしたちは、物理学者にもっと複雑、巨大なもの、せめて蛋白質をみてほしいといいたいのですよ。

朝永　蛋白質というものを量子力学で理解するということに気負いたってる人もいるんですよ。

坂田　ただ少ない。

朝永　田宮さんなんか、むしろなんとかして欲しいというわけですね。

田宮　そうです。

朝永　あいにく今日は複雑、巨大のほうで気負いたってない（笑）者ばかりが集められた。もっとも伏見さん

は両方へ気負いたってる。

伏見　場合によって、気負いたったり、気負いたたなかったり……。

朝永　蛋白質にも気負いたち、量子力学を壊すほうにも気負いたつほうですからね。さっき伏見さんがいわれたのは宇宙全体の移りかわりですね。それを量子力学がほんとに根本的に記述しうるかどうか、そういう問題ですか。

統計的記述の意味

伏見　話が途中でずれちゃったのですけれども、わたしの言い出した真意はむしろ量子力学の統計的な面といったものが、どういう性格のものであるか解明していただきたかったわけです。それが古典力学とくらべての特徴ですからね。

朝永　量子力学で統計的な解釈をくだしているわけですね。それにはやっぱり何回もくりかえせるとか、それからいくつもあるということが、必然的な前提になってるわけでしょう。宇宙全体を量子力学的に記述するということは、そもそも無理なんだ。

伏見　宇宙を何度もつくりなおすということを前提とするから……。

朝永　ですから全体の部分に対しては、量子力学は力をもっていると思いますけれどもね。

伏見　そういうと、われわれは一応はっきりするのですけれどもね。量子力学は宇宙全体を論ずるものでないから、そういうことを論ずるにははじめから不適当であるとね。

坂田　不適当だけれども、そういうものがコンシステントだということはいってるわけですね。宇宙全体がコ

ンシステントだといってる……。

朝永　宇宙全体は空間的にも時間的にも全体とすると一回かぎりのもので、そうしたただひとつのものに統計的な解釈ということはいえないでしょう。そうじゃないでしょうか。

田宮　そりゃそうです。一回かぎりのものについてはなにもいえません。

伏見　それそれ。そういう疑問をまえにだしたことがあります。死んだ天野清さんに向ってそういったのですよ。宇宙論をやるのはバカな話だ。一回こっきりのものを議論しようもない。

朝永　その質問の答は。

伏見　非常にいかん立場だというのです。

朝永　ぼくも富山さんに似た疑問をだしたことがあるのですよ。宇宙論でアインシュタインの微分方程式を解いてる人があるでしょう。微分方程式を解くということは初期条件や境界条件がいろいろ変えられる。そのときに意味があるので、ただひとつ、ただ一回きりしかないものを微分方程式で議論することは、どういう意味があるか。富山さんそんなことといっちゃダメだよといって、逃げちゃった。天野さんの場合と同じかどうか知りませんが。

伏見　似てますね。天野さんの反駁はこうですよ。統計力学でエルゴーデンテオリーというのがあるでしょう。統計力学で対象にしてるギブスのアンサンブル、仮想的なアンサンブルというやつですね。ほんとはそれがなくてもいい。眼のまえにある、現実の気体なら気体のかたまり、それの構造を理解するために、同じ構造をもつようなものをたくさん仮想的に考える、仮想的なものに統計的な考察をほどこして、その確からしい行動がでてくるわけでしょう。確からしい行動に現実の気体がだいだい動いてくれれば、一応それで納得がゆくじゃないか。

眼のまえにだいたいひとつしかなくても、そういう納得のしかたはある。

朝永　しかし眼のまえに、ただひとつの気体があって、しかも統計力学でとり扱えるのは、その気体が実は外部から絶えず作用を受けて、そのたびにその運動状態が壊されては作りなおされているからでしょう。それを時間的な構造と考えるでしょう。ですから、やはり時間的にならんだアンサンブルと考えられるのじゃないですか。

伏見　時間的な構造はですね。それはやっぱり条件によってちがうわけでしょう。エルゴーデン理論によって、ほとんど確からしい行動を統計力学がつかまえたわけですね。ですからそれはエクセプションをやれるわけですよ。そういう意味では、確実な知識ではあくまでないわけですけれどもね。

田宮　朝永さんの、さっきおっしゃった一度こっきりの純粋な歴史的のものは物理学ではとり扱わないということですか。

朝永　そうです。

田宮　一回しかおこらないことだってあとから何とか納得したいと思うのが人情じゃないですか。納得しようとする努力があったっていいんじゃないですか。

朝永　物理学でそれを納得できるかしらんと思うのです。

坂田　つまり、ニュートンの最初の一撃というものでしょう。ニュートン力学の場合だったら、その与えられかたによってあとの動きが決まるけれども、ほんとは与えられていない。太陽系が最初そういう状態になっていたということは、ニュートン力学でとり扱うべきことじゃなくて、ほかの問題であるわけですね。だからニュートン力学のとり扱うものというのは、部分的なものですよ。部分的なものであるからこそ、微分方程式が意義をもつというわけじゃないでしょうか。

朝永　そうです。まさにそうです。みんなその点は同じ、対象は全体のある部分です。

坂田　その問題を説明するにはニュートン力学とは次元的にちがう理論というものが当然探究されるべきものとなってくる。

朝永　次元的にちがうものであることもあるし、あるいはただニュートン力学をもっと広い対象に使えばいいのかも知れませんがね。最初の一撃がなにかほかの天体であって、それ自身までニュートン力学で記述できるものであってもいいわけでしょう。

坂田　もっとほかにたとえばガモフのようなメカニズムも考えられる。

朝永　であるかも知れませんね。

伏見　結局みなさんの確認されることはニュートン力学にしても、量子力学にしても部分的なものに対して確立されたものである。宇宙全体にまで及ぼす可能性はない。

朝永　いくらでもひろげられるという意味で、宇宙全体をつかまえられるということは、できると思うのですけれども。

坂田　その意味がないというわけですね。

朝永　いくらでもひろげられるという極限的な意味でです。宇宙も有限でなくってね、どう広くとっても、その外になんかある。そしてそれが初期条件を決めるとすれば、微分方程式で記述することは充分意味があることになる。

坂田　宇宙が有限であるかないかという問題よりも、もう少し複雑な問題があるのではないでしょうか。内部的な構造に関係して。

朝永　そうです。ですから宇宙全体を——なんといいますかね——対象にする、と口では簡単にいうけれどもね……、それが、その宇宙の外に立って見おろしているような見方ではつかまえられなくって、たとえば、ニュートン力学なら力学の範囲内でもっと広いものを考える。力学の範囲でおっつかなければ、次元のちがった理論ですね。それでいくらでも先へいける、そういう意味で宇宙をとらえるといういきかたしかないんじゃないか……という気がするのです。

坂田　ええ、ええ。

地球上の歴史に限れば

伏見　ええと、そうしますとね、宇宙全体というのは話が大きすぎる。せいぜい地球の伝記ぐらいのところに話をかぎるとしますとね、地球の伝記でいうと元素は与えられたものだと考える。そうすると地球のうえの、いろいろな物質の化学的組成のようなもの、そういったものは歴史的に追究できるものですね。少なくとも、つまりそういう歴史的な追究のなかに生命のオリジンを追究し、それが高等なものに進化するということも追究できる。そういう意味では生命を物理化学的な基礎のうえにたつ歴史性ということも、もちろんはいってくるわけですけれども、基礎におくものは物理化学的なものでいいわけですね。

坂田　と思いますね。

田宮　わたしどもはそうでなきゃやっていけませんね。しかし現在の物理学におんぶしていただけじゃ解釈がどうしてもできないことがあるわけですね。さきほどの話のように現在の偶然論で有機物の発生を説明できないと指摘された場合、われわれはどうしても物質のなかに何か非偶然的なものが潜んでいるというような証明を物

理学者にしてもらいたくなる。

坂田　それはさっき申したのですけれども、地球ができたあとだけに限ってものをいうでしょう。そういうところへ確率を考えるときには、もっとひろい範囲で考える必要があるんじゃないでしょうかと思いますけれどもね。

伏見　さっき坂田さんがおっしゃったことでしょう。太陽と似たような星もたくさんあるし、地球に似たような惑星もいっぱいある。そのなかには、ほとんどこの地球と同じ物理化学的状態にありながら、しかし生命はないといったようなものがある。おそらく、生命のないものが大部分であろう。ほかに何十億という遊星があるとすれば、確率の非常に小さな現象が地球上だけでおこったとしても、不思議ではないでしょう。

坂田　そうです。

田宮　ちょっとへんな解釈だね（笑）。

朝永　地球と同じような状態のものがたくさんあるというのみならず、時間的にもそういう状態が何回もくりかえしてる。そうすれば、いままで何回もくりかえしているうちに、一回もできなかったけれども、たまたま、宇宙において、今回においてできた。

田宮　わたしにクジビキがあたった場合、何も驚くにあたらない、あたらないやつがたくさんあるんだからといわれるようなものですね（笑）。

坂田　幸運であったことを神に感謝してもいい。

朝永　この部屋のおれにあたるはずはないんだ、と田宮さんがおっしゃったときに、坂田さんは日本中をみろ、世界中をみろ……今日だけでなくって、宝クジがでたのは何回かある、と言われるんですね。

伏見　ところでぼく自身は坂田先生の説に反対です。だいたい地球とそうとう正確に同じような状態の惑星ができておれば、やっぱり生命は発生しておったと思う。
朝永　偶然でなしに、なんかあるというのですか。
伏見　やっぱり歴史的な追究ができる過程で生命が発生したと思うのです。
坂田　そうすると、さっきの確率の計算自身には誤りがあるわけですね。
伏見　全くバラバラなケオスのなかからできる確率はあまりに小さいですよ。
坂田　たとえそうであった場合でも、というのです（笑）。

合目的的解釈

田宮　私のとり扱ってる植物などは生きものといってもプリミティブなものですが、動物を観察している学者になると不思議なことがあまりに多いので、しぜん物理学に対する不信が植物学者よりも多くなるのです。そうかといって、自然科学であるからには神様をもち出すわけにもいかないので、合目的的な生命原理という天下りの原理をもち出すことになるのです。
朝永　合目的原理というのは特に素人にはよくわかるのですけれどもね。極端なことをいうと、馬の顔が長いのは、マグサ桶からくうために長いのだ、なんて議論になる。
田宮　血液が赤いのは、ケガをしたときにすぐわかるためだという。これなどは笑話ですが、生物の示す現象で目的論的に解釈するといかにもよく納得のゆくことが無数にある。例えば生物に雄と雌とがあるということですね。原始的な生物はみな無性生殖をやっているが、高等になると植物でも動物でも雌雄が出来て有性生殖をや

る。なぜこんなことをやるかという問題です。生物はみなときどき変異ということをやりますが、これは遺伝をつかさどる遺伝因子という物質の構造が変化するためで、その変化はエックス線や薬物で起ることもあるが、一般には因子を構成している原子の熱運動で偶然的に起るといわれています。そういう変異は何千、何万のうちに一つくらいは有利なこともあるけれども、生物にとって不利なことが圧倒的に多いのですね。だから変異を起したやつは大部分がやがて滅亡するのです。ところで無性生殖だとある個体の起した変異はそのままその子に伝わりますが、有性生殖をするやつでは変異を起した遺伝因子と正常の遺伝因子とが融合するから不利な変異の影響が消されてしまうのです。変異は熱運動にもとづくものだから不可避なものですが、それを打ち消して具合のよい形態を保っていくという意味で有性生殖は目的にかなっているわけです。

伏見　なるほど。つまり雌雄をつくったために安定化される。結婚を三対にしたら、もっと安定化される(笑)。

朝永　安定化されてもその子孫がへっちゃうでしょう。三対になるとそれが出合うという確率がよほどへりますね。

田宮　化学反応の三重衝突がほとんどないのと同じですね。

伏見　物理のなかに、全然目的的なエレメントがないということはいえないでしょうね。たとえば力学で、大昔のことをいいますけれどもね――全部目的論的に書きかえよう、という話がある。光がまっすぐに進むのはなぜか。いちばん早く到達する道だ。力学をそういうふうに書きかえたモーペルチュイの最小作用の原理、そういうものがある。

朝永　物理の場合には、法則を因果的な微分方程式で記述するのも、そういう最小作用の目的論的なかたちで記述するのも、全く同等なんですがね。かたちがちがうだけで。

田宮　同等ですか。

伏見　ええ。

田宮　目的論的な解釈は大いに魅力があるけれども、現在の生物学がそれを意識して避けているのは、結局それでは神様を考えるのと同じになっちゃうからでしょう。もうひとつの理由は生命現象の中にはどう考えてみても合目的的でないことがたくさんあるからです。

朝永　そりゃそうでしょうね。しかしそりゃ目的論者にいわせれば局部的な現象でしょう、全体としてはやはり目的にかなってるというでしょう。

田宮　全体としては神のおぼしめしの方向に進んでる。有性生殖をやって安定したために人類なんか栄えてきたのでしょうが、有性生殖をしないバクテリアだってときどきは変異のために大量の滅亡をやることはあっても数の点では大いに栄えてるし、何よりも重要なことは億兆回に一回の有利な変異によって人類をしのぐような大進化をする可能性さえ与えられている。人間とバクテリアとどっちがいいともいえない。生物学は意識的に目的論を排除しているといいましたが、実際は無意識的に目的論に浸って喜んでいる面がある。生命現象の記述を全く目的論なしにやった場合、実に索莫たるものになります。

伏見　話をあんまり素粒子論から離したくないものですが、量子力学のほう、素粒子論のほうではそうはしないですか。……量子力学では目的論的な考えはない……。

朝永　ないですね。変分原理があるが、あれはただ形式だけですね。目的論的ではないけれども、因果的ではない記述は、例のファインマンの遠隔作用、ああいう記述もないことはない。しかしあれは形式だけの話で、内容は全然通常の記述と同じだ。

田宮　因果律を逆にすると目的論になるということをよくいう人がありますが、物理学では可逆的にものをみる態度がよくとられますね。

朝永　ええ。ファインマンの記述のしかたというのはね、非常に妙な考え方ですけれども、ここに光源があって、むこうへ照っていって、むこうへ届く。そしてむこうで影響がおこる。そういう普通の考え方をしないのです。それは必ずしもそういう考え方をしないで逆に影響がおこるように、こちらでうける影響を予定して、こちらがまえもって行動するのだ。一種の予定調和的なもの、そういう考え方でも、自然現象を記述できる。そういうことをやってみせたのです。たとえば今日の何時何分に光がでる。非常に遠いところは、光の速度は有限ですからおくれてくるわけですね。こっちが原因で作用が伝えられてゆく、あと何時何分に、こういう現象がおこったのだと考える。そういうかたちに法則をあらわしていった。逆に何時何分にこっちが動くことを予定して、こっちが動く。そういうように記述しても、いっこう実験とあわないことはない。

田宮　ひとつの式にしてしまえば、左から読もうと、右から読もうと、同じでしょうね。

朝永　物理じゃ式を読むときの読み方ですね。因果律的に読むか、予定調和的に読むか、そこは式そのものから何も決まっていない。つまり、あるものはあるようにあるんで、因果的にみるか、予定調和的にみるかは人間のかってだ。

田宮　それならさっぱりするのです。

坂田　物理ではどっちの見方でもできる。

朝永　古典力学の考え方と、目的論的な考え方。微分方程式のかたちにもってゆくと因果的にとらえられるようになるというのと同じかも知れませんけれどもね。

坂田　目的論的なもので説明されてるもので、そうでないもので説明されるかも知れんということを予想させるわけですね。

素粒子も生物的

伏見　しかし素粒子までいったら話は簡単になるとお考えになってはまちがいですよ。素粒子へいきましたら、話が複雑になってきちゃったのですよ。

田宮　素粒子論のことはわれわれにはむつかしくて全然わかりませんが、その複雑さと生物の複雑さとはちょっとちがうのじゃないですか。

伏見　いや、そうでないと思うのですよ。かなり似てると思うのですよ。素粒子の段階へいって、生物的なエレメントがついてきた。昔の原子論の立場ですね。ギリシャの学者が原子を考えたときには、変化がしょっちゅうおこなわれて、これじゃ不安でたまらんというわけで、変化のなかにあって、変化しないものをみつけだそうという要求から原子ができてきたと思うのです。気体が液体になってしまう変化はありますけれども、水の分子は変わらない、というのが考える基礎になっている。変化の中の変わらないものを求めたわけです。窮極の、いちばん変わらないもの、と思っていたのが、湯川先生の発見された、中間子にも一億分の二秒……という、はかない寿命でなくなっちゃう。死んじゃって、また生れる。つまり、生れたり、死んだりしてるのです。原子世界では、生死のない世界を探究していたのですが、素粒子の段階では生とか、死とか、あらわれてきちゃったので

す。そういう意味で、生物的なエレメントが新しく登場してきた。新しく感じられるのですけれどもね……そういう感じはどうですか。

朝永　変わらないものを主演する役者が粒子でなくなったのですけれどもね、しかし変わらないものはやはりなんかあるわけでしょう。たとえば場というようなものが残っている。

坂田　場ってものにも、いろんな種類があるでしょう。

朝永　ただひとつになっちゃうと思っていたのは錯覚だったけれども、いくつか、たくさんあるでしょうが、そこに、なんかやっぱり変わらない厳然としたものがあることはあるでしょう。

田宮　変わらない厳然としたものを考えたいというのはわれわれ人間の本性じゃないでしょうか。

環　境

伏見　はじめのころのその変化しない原子は空間的に小さなものでありさえすればよかったのです。素粒子の変わらないというのは、抽象的なもので、空間的にいくら小さくてもダメなんですよ。そういう意味で、まるで性格がちがってる。もうひとつ、似てるところはね、環境というものが非常にものをいってるような感じがするのです。いままでの物理学の重要な性格というのは、なんか、ある物質的な体系がまわりからきりはなされた、ほかのものを考えないで、それだけをとりだして考えたり、充分探究することができた。生物はそういうわけにはいかない。たとえば空気なら空気をとっちゃうわけにはいかない。社会からきりはなして、ロビンソン・クルーソーを想像することはできない。環境を考える考え方は、生物学の特徴だと思うのですが、それと同じように素粒子も環境というものを、ほかのものとの相互作用を考慮にいれなければ、ただひとつのものだけとりだして

考えることができないようなことになった、といっちゃいけませんか。

坂田　そうだと思いますね。ぼくなんかそれを主張してるわけだ。

朝永　ですから電子とはなんだということが非常にむつかしくなっちゃう。生きものの場合だって、実際どこから……田宮さんの指一本切っても田宮さん、腕を両方とっても田宮さん。そうしていくとどこまでが田宮さんかむつかしくなっちゃう（笑）。あるいは肺のなかにある空気が田宮さんであるかないか。

田宮　今世紀のおわりごろになったら人間の体をばらばらにして、すべての細胞を組織培養で生かしておけるようになるかも知れません。そうすると、ばらばらにされたわたしははたして殺されたんだろうか、生かされてるのだろうかということになる（笑）。

朝永　素粒子の場合もそれと同じようなこともあるので、電子がある場合にはそのまわりに電磁場ができて光がくっついてるはずなのですけれどもね。光がどれだけ電子にプロパーに属してるものか、そこがはっきりしない。昔は電子だけがある、光ときりはなして、電子だけがあると考えて、そういう抽象的な電子が電子だと考えたのですけれども、どうもそれじゃぐあいが悪くなってきた。電子の場合はまだいいですけれども、中間子になると、なおそういう問題がでてくる。

名前が先か

田宮　素粒子論に生物学と似た面があるというお話はおぼろげながらわかってきたような気がするのですが、わたしには物理学と生物学との間にもっと根本的なところで違いがあるように思えるのです。物理では電子というものを直接目で見た人はだれもありません。いろいろな現象との関係を理解するのにそういうものを考えると

都合がよいので、それを考えて電子と名づけたのでしょう。$\frac{1}{2}mv^2$ という値が重要な値だとわかってから、これに「運動のエネルギー」という名前がつけられる。つまり操作がさきにあって概念が出来、概念と概念の間の関係が追求されるのでしょう。ところが生物学では多くの場合その反対で、まず名前がなまなましい形で存在している。早い話が松や梅という概念は大昔と今とで大して変わっていない。「病気」とか「健康」とかいう言葉も、医学ではよく使われるが、言葉の内容は昔ながらのものです。生物学ではこのように言葉あるいは名前がさきにあって、それを研究しようとするから、いろいろの混乱が起るのだと自嘲する生物学者がいます。

坂田　素粒子とはなにか、たくさんの種類の素粒子はどこがちがうのか、またほんとの電子とはなにか、わからないですね。

伏見　やっぱり、名前のほうが先のようですね。

真空とはなにか

朝永　たとえば、いちばん痛切なのは、真空とはなんであるか。われわれは真空というものは、あるものだし、わかったつもりでいるのですけれども、それがいったい何だということか、さっぱりわからない。真空の問題というのは、ながい歴史があるのですけれどもね。けっきょく、いまだに、わからないでしょう。

田宮　われわれには、なにもないところだと、すぐわかるような気がしますけれどもね。

朝永　ところが、なんにもないとは何であるか（笑）。

坂田　ディラックの電子論がでたころには物質のいっぱいあるのが真空だということに、一度なったのですよ。

朝永　一度なったですよ。いま、物ということがはっきりしなくなった。光というのは物質じゃないと考えて

いたのですけれどもね。いまじゃ光というものは、ほかの物質、素粒子とか電子とかなんとかいうものですね、それとなんにも差別待遇する根拠がなくなっちゃったのです。そうしますと、物がないというのは、第一、光もないことですね。ところが、さっきいいましたように、素粒子は死んだり生きたりでしょう。そして素粒子を生んだり死なせたりする能力を荷うものとして変化しないであるものは場だ。ですから、光の場、電子の場というものは空間にいきてるわけです。電子がなくたって、光がなくたって、その場というものは、いつでも存在し、かつ作用しあっているわけです。

田宮　場どうしがですか。

朝永　ええ。そうしますと、ほんとの意味で電子もなく、光もないという状態は自然に存在しなくなる。電子がしょっちゅう、できたりなくなったり、光ができたりなくなったり、いたるところでやってる。そこで真空を簡単にものがない場所だという定義ができなくなる。

田宮　素人の質問ですが、いったい、場というものはどこまでも場であって、量子になったりはしないものですか。

朝永　量子（あるいは粒子）というのは、つまり場の状態ですよ。場がある状態になってることを、量子がそこにあると考えるのです。そのときは、場がある運動力をもっていて、そこに量子（あるいは粒子）があると観測されるわけです。

伏見　田宮さん、不確定性原理をご存じでしょう。確定的に考えては不可能な状態も仮想的には存在しうるということなのです。たとえば、このガラスの器に水の分子がはいっています。水分子が器をつきぬけて出ることはないわけですね。しかし原理的可能性としては、つきぬけて外へ出られるのです。実際問題としては確率は小

さくなるというだけで、可能性というのはあるわけですよ。現実にあるということのほかに、可能性をいつも考えあわせなくちゃならなくなった。真空はものがないといってもいいんですけれども、実は物質ができるという可能性をはらんでるわけです。だから簡単にものがないということができないというわけです。

朝永　なるほどうまくいいましたね。

田宮　終始一貫した理論をつくるためでしょうが、ずいぶんかってなことをいうものですな……。

朝永　しかしそれで終始一貫した理論ができりゃ、たいした収穫でしょう（笑）。

田宮　どんなに強引でもいいから終始一貫した理論をつくれというなら、ぼくだってできるかも知れません（笑）。

朝永　ぜひやってくださいよ。光合成なんかやめちゃって。

生物進化のあとづけ

田宮　とっぴょうしもないことをいいますがね、人類の先祖と思われるネアンデルタール人とかペキン人とかの骨がいろいろ残っているでしょう。あれといまの人間の骨とを比較してみると、この何十万年かの間に一番いちじるしい変化をした部分は頭だそうですね。象の進化の場合に鼻が長くなりだすと、むやみにやたら長くなっていったように、一定部分の変化は当分続くのが普通ですから、人間の場合にもこれからまだまだ頭でっかちになっていくのでしょう。

伏見　それは何万年くらいのあいだですか。

田宮　百万年くらいのことだといわれています。頭が異状な発達をしたために人間ではいろいろぐあいの悪い

ことがおこってるのですよ。大きくなった脳の圧力で鼻の穴がまがってしまったのでバイキンなどはいつでもクシャミで吹き出すことがよくできない。馬や犬では鼻すじがとおっていますから、いけないものはすぐに吹き出せる。だから風邪をひくのは人間だけで犬や馬は絶対ひかないのだそうです。

坂田　抗ヒスタミン剤の広告にそうかいてあった（笑）。

朝永　風邪をしょっちゅうひく人間は、いちばん高等だ（笑）。

伏見　なるほど、朝永先生がいちばん高等らしいや。

田宮　人間の先祖ももとは四ッ足で歩いていたでしょう。われわれの体は四ッ足で歩くのに都合がよいように、いろいろの内臓が背骨からぶらさがっている。それがあと足だけでたって歩くようになったものだから、内臓のぶらさがり方が変になってきた。そのために人間だけにあって動物にない病気がいろいろあるのだそうです。

朝永　いろんな人類、ネアンデルタール人、クロマニヨン人など、一方から他方へ変わっていったものか、それとももともとがちがうのですか。

田宮　それにはいろいろ議論があるらしいですね。

朝永　かたっぽうが栄えて、かたっぽうがほろびた。それは天変地異によるのですか。

田宮　進化論でよく問題になることですが、ある時期から新しい形の生物が登場した場合、それとそれ以前のものとの中間の形の化石が当然見出されていいはずですが、それがたいていの場合は見出せないのだそうです。たとえば爬虫類は魚類から由来したものと思われるが、爬虫類と魚のあいだをつなぐものが全然見出せない。これはどう説明されているかというと、いったい化石として残ってるやつは、ある期間地球上に非常にひろく分布して栄えたやつ、つまりその当時の状態に非常によく適応していたやつです。ところが、あんまり一定の環境に

適応してしまうと、その生物の生活様式は固定化してしまって、何か環境に変化が起った場合にそれに打ちかつことができないで死滅してしまうのです。変わった環境になっても生きながらえるやつ、つまり次の世代を引きうけるやつは前の世代では充分適応してなかったやつですから、その世代では弱者であり、少数党であったわけです。そういう少数の弱者がいつの時代にも必ずいたわけで、それらの中から幸運にも選ばれたやつが次の世代の生物の祖先になったのです。彼らは少数なのですから化石は残らない。化石の残るような適応者は安定した状態にいたものですが、次の世代の祖先になるような先覚者は常に不安定で不遇であったのです。こうした不遇者の連続が現代までの生物進化の正統系図を構成するわけで、化石に残っているようなやつは進化系統樹の横路の袋小路に迷い込んだようなものだというのです。

朝永　ゆきづまった末のようなやつが残ってくる。化石になる。

伏見　化石になったようなやつの子孫はもういないというわけですね。化石をたどって系統をつくろうというのは無理な話……。

田宮　適者生存という言葉はダーウィンやラマルクのいったことですが、こうした考え方からすると、むしろ適者こそ消えさるべきもので、あとに残るのは非適応者であるということになる。

伏見　つまり自由党は将来ほろび、社会党が栄える。

朝永　それはわれわれの経験からいって、ほんとくさいな。われわれの経験というのは物理学だけですけれどもね。相対性原理がでた後で輩出した理論科学者なんて爬虫類になった。素粒子なんて、できあがらないからいいんで、できあがったら、おしまいだね。あの大きなダイノソールスが突然消えてなくなったのは、どういうのですか。環境が非常に変わったせいですか。トカゲとあいつと比べると、どうもあんまり大きさがちがうんで驚

くのですがね。将来人類と同じようなかっこうしてるけれども、こんなにちっちゃいというのが栄えるかもしれない（笑）。

田宮　大昔に栄えた爬虫類の名残りだと言われる大トカゲが、南洋のコモドという孤島に住んでいます。ベルリンの動物園に五、六匹飼っていたのを見たことがありますが、六、七尺くらいの体でカンガルーのように後足だけで立ち上がるかっこうはなかなかすごいのですが、動作がいかにもぶきっちょうなうえに、顔が羊のように優しい。現在残っている爬虫類はワニでも蛇でもみな意地悪い顔をしていますが、この大トカゲはいかにも時代にとり残されそうな柔和な顔をしています。

伏見　貴族の裔ですね（笑）。

朝永　平家の末裔（笑）。

伏見　素粒子のほうで生命の長いのは意地悪だということにはならないでしょうか。電子とか陽子は意地悪で、メソンというのはかわいらしい。

朝永　いや中間子は意地が悪い、なかなか本性を明らかにしない。いやいやしてる。いやいやしなくなったら化石になっちゃう。

田宮　あらゆる生物のうちで人間が現在では進化のトップを切っているとは軽々しくは言えないが、いろんな他の生物や自然一般を、完全ではないまでも統御しているという点で人間が勝っているとはいえるでしょうね。

坂田　つまり環境に適応することができなかった。人間は環境を変える能力をもち、それによって生きのびられる可能性をもったわけですね。

田宮　ただ今後のことを考えると、頭の大きくなり方が、へんな方へ進まねばいいがと思う。

坂田　場合によっては化石と同じ運命をたどるかも知れませんけれども、たどらない可能性はできたわけですね。

田宮　前に言った象の鼻のように変化が起りだすとむやみに一方的に進展するのですから、人間の頭の場合も今後が心配です。これまで人間というやつは進化の舞台に登場する役者の一人にすぎなかったけれども、いまでは役者であると同時に舞台をみて、それに手を加える演出者にもなった。この点はたしかに人間がほかの動物と違うところでしょう。

坂田　生物は、はじめはなにか——偶然か偶然でないか知らないけれども——できちゃった。できちゃえば、——なんというんですか——どんどん進化してゆく。宇宙の進化は生物ができるというところで非常な質的飛躍があったわけですね。それと同じことが生物の進化のなかで人間ができたというところにあるわけですね。人間の出現以前の生物の進化とは、なんかちがった新しい質が発生したといえるでしょう。これは、はなはだ人間中心の考え方ですけれども。

田宮　そりゃね、謙遜する必要はないと思いますよ。人間は、生物としてたしかに勝ってると思いますよ。

朝永　謙遜する必要もないかも知れませんけれども、結論を出すには人間ができてから短かすぎるかも知れません。

理論発展の段階

伏見　頭そのものの、考え方そのものの——なんといいますか——質的な発展というようなものですね、そういうものは坂田先生どうお考えになりますか。素粒子論の方法なら方法……の中の質的な発展段階といったもの

は考えられませんか。ニュートン力学のなかの思考の形式、画期的な段階を考える。また別にファラデー・マックスウェルの思考を分析する。そのなかに筋道を発見して、素粒子の新しい課題に適用するとき、過去の歴史的事実の分析からなにか法則性を発見する。……それを意識的に使う。それは質的な発展ですね。

坂田　そういう意味で現代の素粒子論の方法というものは画期的なものといえるかも知れません。今後の理論物理学は、もはや相対性理論のたどったような道はたどらないと思うのです。相対性理論ではそういう分析は比較的しなかったわけでしょう。ところが量子論ではボーアの対応原理的な考え方とか、ハイゼンベルクがいろいろやったようなアナリシス等を通じていちじるしい方法論的発展があったと思うのです。相対性理論の時代と、ニュートン力学時代、いまの量子論の時代をくらべてみると、非常な質的ちがいがあるのじゃないでしょうか。

朝永　つまり相対性理論でも一部そうなんですが、ことに新しい理論では、日常的な考え方と非常にちがったものにとっくんだわけでしょう。日常的と異なった考え方をせねばならぬという抵抗が、ニュートン力学までは自覚しない、意識しなかったものをいやでも意識せざるをえなくさせたということもあるのですね。

坂田　ニュートン力学のときには、適用性の限界をすら意識しなかった。相対性理論ではいくらか意識してきたわけですね。量子力学になると、非常にはっきりしている。

朝永　こうして物理学の理論の意味がはっきりしてきたわけです。しかし坂田さんなんかの主張はそれだけじゃまだ満足できないで、もっとさきまで行こうというのでしょう。

坂田　ええ、武谷君や私どもの方法論は、ボーアやハイゼンベルクの方法をさらに深化させたものだといいたいのです。

伏見　田宮先生ね、坂田さん、武谷さんの方法論は素粒子を動かしている考え方そのものを、もうひとつ上の、

高い立場から見ようとする、考え方そのものを高い立場から吟味して、探究の方向をもっと高いところから制御する研究の態度が十九世紀以前と変わったところまできてる、というわけなんです。そういう意味の探究の方法の質的な発展というようなものは、生物のほうでもあるでしょうか。

田宮　生物学を歴史的に見れば別ですけれども、現在の段階では今お話しのようなはなばなしいことはどうも生物学にはないような気がしますね。あるとしてもごく局部的のものでしょうね。物理学が柔道のたちわざなら生物学はねわざでじりじりと地味にやってるのです。昔の生気論や目的論を排除して生きものを物質からなるものとしてみていこうという謙虚な立場が近世になって確立してからは、生物学の進み方は物理学とちがって実にねばっこい地味なものになってしまったのです。このねばっこさでいろいろなビタミンがみつけられたり、病原体が発見されたりしたのです。

朝永　しかし、それはねわざでいこうということを、はっきり意識されたわけでしょう。その意味でやはり発展だ。

田宮　それはある点では物理学のおかげでしょうね。物理学がそのときどきに首尾一貫した考え方を押し通そうとする強引な態度を教えてくれた。あの不思議に満ち満ちた生物を単なる物質の系として見るという態度に徹底するには相当強引な決心がいります。しかしとにかくそれで押し通そうじゃないかということになったわけですね。

坂田　理論物理学というものができてきたのは、ほんとは二十世紀ですね。十九世紀の理論物理学は、理論体系はできていて、ただそれを数学的に解く数理物理学だったわけです。二十世紀になってから本格的な理論物理学が成立したといえましょう。

田宮　だけど、ニュートンやカントなどの考えた一義的な真理、そういうものが実際あるのかないのか知らないが、とにかくそういうものにあこがれてこれを求めていこうという態度ですね、それに非常に影響されたのですよ。ニュートン力学から相対性原理、それからさらに量子力学と物理学もだんだん変貌したけれども、その根底にはいつも一義的なものを念願するものがあったのじゃないですか……。

坂田　というよりもそれの理論が自分自身の適用限界を意識したというほうがいいんじゃないかと思いますけれどもね。

朝永　つまり適用限界がより広くなった。それと同時に適用限界をはっきり意識したわけですね。ワクが広くなって……つまり適用限界の広さというものを物理学者が口に出すようになった。限界が有限であるということを意識したわけですね。

伏見　ですから宇宙論なんかは素粒子論というのは手を出さない。

田宮　その態度は非常に謙遜で結構だけれど、もうちょっと若気のいたりでそこまで口を出してほしいという気がする。

朝永　口出す人もありますよ。

坂田　口出すのがオーソドックスではないという限界だけですね。

朝永　さっき田宮さんは生物学ははなばなしくないと言われたが、それはどうともわからないですよ。おくれてる……すすんでる問題もあるでしょうが、やっぱり質のちがいじゃないでしょうか。素粒子論はむつかしいものだ、というふうに田宮さんは考えてられた。しかし……。

田宮　もちろん素粒子論はみなさんのような秀才でなければできないものだと思っています。ところでわたし

が不満なのは秀才がみんなそちらの方へ行って生物学には私のような鈍才だけが来る、生きものは素粒子よりも複雑なのだから、ほんとうはこちらの方へ秀才がこなければならないと思うのですが。

朝永　素粒子やってる連中は、簡単なことしか考えられない人間だ。

坂田　そうなんですよ。複雑なことにはとても頭がまわらない。

伏見　現象そのものをみれば、実に簡単なものですね。要するにトラックからツノがでたりなんかしてるだけですからね。

田宮　ぼくなんか、オーソドックスの生物学者には、あいつは生物学者じゃない、物理や化学のまねごとをやっているにすぎないといわれます。自分ではひとかど生物学者のつもりでいるのですが、物理学をうらやましく思っていることも事実です。わたしが物理学に心をひかれるのは、その対象の簡潔さと考え方の清潔さです。このつぎ生まれたらもっと秀才に生れて物理学者になりたい。もしその次もう一度生れかわってもっと秀才になったら今度は再び生物学をやってみたい。

素粒子論をやるいろいろの態度

坂田　さっき伏見さんが質問された、とにかく現在の素粒子論には対象自身に、どんなものがあって、どういう構造があるかという問題と、これらの従う法則が現在の法則よりももっと進んだ法則なのではなかろうかという面、それから現在の法則といいますか、現在の理論形式にもとづいて種々具体的な問題を処理する際の数学的な取扱いの問題、この三つの問題はいつでもある問題じゃないかと思うのですが。

伏見　ざっくばらんにいって、坂田先生はどっちの方をやってるわけですか。

坂田　だから、ぼくらは数学が達者でないですから、結局、その構造の方をやかましくいってる。別にそれだけが唯一の問題だというわけじゃないのですが。

伏見　じゃ、朝永先生はどちらですか。

朝永　これは趣味の問題ですよ。

坂田　そうですよ。

朝永　自然界にどんなものがあるか、なにがあるか、ということは、武谷君や坂田君におまかせして、そうでない方、つまりどんな法則がそれらを支配しているかという方面をいままでやってきたわけです。これからも惰性でそっちの方をやっていこうと思ってるのですがね。つまり、ぼくの場合は非常に保守的だったのですよ。ボーア以後の量子力学の発展というのは、だいたいその傾向でしょう。実体を導入するというよりもむしろ量子の法則を求めるという形……。

田宮　実体を導入する方法でないというと、すでに知られたいろいろのことがらの間の調和を求めようという立場ですか。

朝永　自然が原子とエレクトロンと原子核でできてるということだけで、それ以外に新しくものを考えて自然現象を説明しようというのでなくて、法則を変えてゆく。

坂田　ですけど、そのまえに原子がなにからできてるかということが必要だったわけですね。

朝永　ぼくがいうのは、ボーアからあとです。ものを加えるのでなくて、ものを表現する法則のちがいを求めた。ぼくはこの量子力学のゆきかたに魅了されちゃった。それでいま素粒子論をやる場合にも、そっちの面をやることになっちゃったのですよ。

坂田　朝永さんの卒業された時代がそうだったということと関係があるのでしょう。ぼくたちが卒業したときはちょうどいろんな素粒子がどんどん発見されていた時代で、その意味でやはり時代の影響をうけたといわねばならないでしょうね。

朝永　だから坂田君は、ぼくはそうえらいと思わない。育ったのがそういう時代でしょう。ところが湯川氏の場合は全然そういう時代じゃなかった。中間子を導入する気になったのは、なかなかえらいと思うのですよ。だけど両方のゆきかたが必要ですね。

坂田　必要であるだけでなくて、量子力学のときには二つの傾向が時代的にくぎりがつけられたわけでしょう。ところが素粒子論になってくると、くぎりをつけることができなくて、いつでも、いっしょにある、そこで分業ということが重要になってくる。両方をやろうと思っても、結局はかたっぽうに首をつっこまざるをえないわけでしょう。

伏見　そういうことで学問の共同研究が非常に大きな意義をもってくることですね。田宮先生に説明しますと、二つの方法というのは、たとえば、脚気なら脚気という病気がある。脚気という病気を説明するのに、湯川さんのなさったことは、ビタミンBという実体をつかまえたことです。ビタミンB欠乏症だけで説明できるかどうかは、現在でも疑問だと思うのですがね。実体を拾いだしたあとに、なおかつ脚気という病状が残るとすれば、別種の物質というところに求めるのでなくて、生理的な機能に求めなければならない。

田宮　いや、よくわかります。生物学者にもその二つのタイプがあるのです。私の傾向もどちらかというと、朝永さんのタイプで、これまで新しい物質や新しい生物をみつけたことなんか、一度もなく、これまで無関係な現象として記述されてきたものの間の関係を見出すようなことに興味があったわけですね。しかしこんなタイプ

の研究よりもビタミンBとかペニシリンとかいう実体をみつける研究のほうが、はなやかですね。

伏見　はなやかな時代が、そうとう続いたでしょう。生物、お医者さんのほうでは、少しそれでとらわれすぎてることがあるでしょう。ガンなんか物質的なものをさがしてる傾向が強すぎるのでないでしょうか。どうも物質のなかに、物質ばかりに眼をつける。それで両刀を使わなくちゃならんというお話をされたわけですか。

坂田　両刀というよりは、三本だろうと思いますね。

伏見　もう一本はなんですか。

坂田　新しい法則性という問題のほかに、純数学的な近似法の問題があります。もっとも、この二つは、きりはなしがたいですけれどもね。つまり、全体として対象の構造の問題、それの法則性の問題、ならびにその数学的解法の問題、この三本です。

犬も歩けば

田宮　理論物理学者の立場として、そうおっしゃるのはわかりますが、科学者のやり方としては、もうひとつ未知の世界をむやみに探検するという手がありませんか。あまり頭のほうは使わないで。

朝永　それはもちろんあるわけです。

田宮　それが生物学では非常にたくさんあるわけです。

朝永　もちろんある。ここは理論物理屋ばかりいるので、つい理路整然とした話へいくけれども、それはあるわけです。

田宮　そういう研究には犬も歩けば棒にあたる的の面が多分にありますけれども、とにかく全然知らないこと

をみつけられたら、ぐうの音もでませんからね。

朝永 われわれはすこし理論的な面を強調しすぎるかも知れませんですね。

伏見 たとえば、コスモトロンとかベバトロンとか巨大な装置をつくりまして、メソンを人工的につくりだす実験が行なわれれば、理論屋があやしげなことをいってるやつが、一挙にして粉砕される。

坂田 一九三〇年ごろから量子力学が発展したのは、サイクロトロン等ができ、原子核が容易に破壊されるようになってからの話ですからね。

朝永 物理でももちろん生物におとらずそういう例が多いです。

坂田 それを前提としてるわけです。

伏見 自然科学として自明ということになるでしょうけれども、生物と物理のちがいますのはね、生物や化学の場合には類型的な問題で解決できる場合がたくさんあるが、素粒子論の材料は非常にわずかしかないでしょうから、新しいエキスプロレーションやるときには、新しい企画をたてなければならない。企画をたてるためには、理論がある程度指導しなければできない。犬も歩けば棒式は物理にはないのですよ。

朝永 いや、なくもない。ときどきはあるのですよ。ときどきだが、あると大きいのだ。つまり理論屋が考えてなかったことですからね。しかし結果の大きさとそういうことの起る確率と掛けてみると、どっちが大きいか……。

伏見 とにかく今世紀の理論物理学の比重が非常に大きくなったことは否定できないわけですね。

朝永 そうです。否定できないわけですね。

伏見 つまりなんらかの意味で理論がそれをサジェストしてることが大きくなってきた。

坂田　まぐれあたり的なものを狙うと誤りが多いわけですね。

理論の現状

伏見　さっき三本、武谷さんの三段階とは関係ないわけですか。
坂田　だいたいそうですけれどもね。その三本というのが、一九四二年の中間子討論会の計画がその三本で行なわれてるわけですね。
朝永　まあしかし二本でしょう。本質的なところは。
坂田　本質的なところは二本です。
伏見　そうでしょうね。正統論のよしあし、といったところですね。
朝永　本質的な部分と、法則の部分と、実体の部分を分けるのに、正しい数学を使わなくちゃいけない。どっちかというと、手段的なものですね。
伏見　技術的ですね。サイクロトロンでいえば、真空をいかによくするかというところですね。
坂田　しかし技術的なものだといって無視はできないでしょう。三つの段階というのも認識の三段階なのですから。
朝永　理論は必ず数学の表現をとるわけです。
伏見　必ず数学的な表現をとらなければならないという理論はありますか。
朝永　そりゃ、ものをいうには言葉がいるというのと同じことで、物理的な実体を記述するのに数学的な言葉がいるということだ、と考えちゃどうです。

伏見　言葉が新しくできたら、みんな数学と名づける。トートロジー……。

朝永　とにかく普通の言葉じゃたりない。

伏見　それでね、素粒子論、朝永先生の超多時間理論以来、シュウィンガー、ファインマンの流れは、どういうふうに特徴づけたらいいんですか。いままでの理論とは、質的にちがっていない。さきほどの、かきかえの問題ですが。

朝永　いままでの理論のワクのなかで、ギリギリまでいったということでしょうね。もうひとつ質的に多少問題になるのは、素粒子は複雑なものだということを自覚したことですね。環境ときりはなせないものだ、ということをね。そういう積極的な自覚の上にできてるでしょう、この流れは。

伏見　というのは、やはりああいう発展の段階を予想してる。予想しておってやると、一本だけ、別のちがった観点を組織しなおすときの、近づきやすい道を模索してる。そういうふうにいってよろしいですか。

朝永　そうでしょうね。

伏見　いいんですか。

朝永　やってる本人は意識しない。意識しないことはないけれども、まあほんとだかどうかわからない。

田宮　既知の事実にもとづいてある理論をたてると、思いがけない問題がとび出してくる。それで新しい実験をくわだてるというようなことは私などの場合でもよくあることです。たいへん失礼な質問ですが、朝永さんの理論の場合、この方向に犬よ歩け、なにかにぶつかるだろうからというようなことが、いろいろありましたか。われわれの場合とは比較にならないようなことでたいへん失礼だけれども。

朝永　僕自身はもちろんこの方向に歩けば棒にあたるだろうと多少の見通しはもっていたのです。しかし、他

の犬に向ってこの方向に歩けという点からいえば、湯川さんや坂田さんのいきかたのほうがはるかに多いと思うのですけれどもね。

伏見　それは将来の問題でなんともいえない。

朝永　二中間子があるということは、あるかどうか探してみろということをいってるわけでしょう。裏にいってるわけですね。

坂田　そうです。C中間子論でも、朝永・シュウィンガー理論の背後には、なんかなければいけないということをいってるわけです。私の主張もやはり環境といいますかね、素粒子をひとつだけで考えないで、全部いっしょに考えなければいけないということです。しかし、朝永・シュウィンガー理論ではそういうことがかくされてしまったように思うのです。もっとも最近朝永さんの理論自身でも、結局、そういういろんな場を同時に考えないといけないというようなふうな傾向にあるわけですね。たとえばマシュー等の研究ですね。

朝永　理論的にある結論が出た。じゃこういう実験をやってみろというほどの具体性からいうと、湯川さんやあんたのほうが簡単明瞭でしょう。

坂田　簡単明瞭……そうかも知れませんね。

朝永　ぼく自身としちゃね、予言するのは嫌いなんですよ（笑）。あたらないときに、ひどいことになりうる（笑）。

伏見　あたらないために、ひどいめにあったという例は、あまりないんじゃないですか。あたったために、ほめられたことはあるけれども。

朝永　ひどいめだって、たいしたことじゃない。だけど、へんな予言はしないほうがいいでしょう。それを信

じる人がわるいのだけれども。

坂田　しかし、やっぱりなんかの意味で、予言はあるわけでしょう。予言があるから理論は進歩するわけですね。また実験を指導もできる。やっぱりなんかと予言は出てきているわけじゃないですか。理論と合うか合わないか、実験的に確かめられていないことが、理論的にいつでも出てくるでしょう。なんかのかたちで予言は必ず出てくるでしょう。

朝永　理論の将来の方向はどうであるか、というようなむつかしいことを皆にきかれるのでね。ぼくの予言ぎらいはそういう質問に対してです。

坂田　理論の方向は、理論自体の研究からは生まれてこないでしょう。もう少し広い観点から出てくるのじゃないでしょうか。

伏見　メタフィジックスですか。

朝永　そうなんです。メタフィジックスはあんまり口にしたくないということ。

田宮　朝永さんは、実験犬よ、この方向に歩け、じゃなしに、理論犬よ、この方向に歩けという態度なのですかね。

朝永　いや、歩けというのは、きらいなんです。

伏見　ファッシズムがきらいで、号令をかけないのですよ。

田宮　読む人が、自発的にこの方向に歩いてみよう、ということになるのですね。

朝永　そう、そんならいい。

伏見　そりゃ、若い人は影響を受けてるわけですよ。

坂田　こういう方向もあるし、ああいう方向もあると、認められるわけですね。それぞれの方向の関連を明らかにすることは大切だと思うのですが。

伏見　メタフィジックスをやっていただきたいということですよ。

坂田　物理学からはなれるという意味では、メタフィジックスですけれども、理論の発展の理論は、やはり科学的な研究から出てくるべきものじゃないでしょうか。

朝永　やっぱり歴史的研究でしょうね。しかしぼくには、それから「AはBである」というようなはっきりした結論がまだ下せないのですよ。ぼくには漠然としたものは……。

伏見　その点は直観に、むしろ訴えられておられるということですか。

朝永　直観ですか。まあそうですね。

坂田　それは科学としてはまだ未発展の時代にあるんで、そういう要素がたくさん必要になるわけですね。

朝永　ええ。

坂田　しかしそこには法則性が発見される可能性がある。現にいくぶん発見されてるわけでしょう。

朝永　いますぐ法則を「AはBである」というふうな形にフォーミュレートするのが時間尚早という感じがするのです。あるいは、少なくとも、ぼくにとってね。これは、ひとつは教育的な考慮もあるですよ。例えば語学を練習するのに、文法をはじめからやったほうがいいかどうか、平川唯一式にやった方がいいか、そういう考慮もあるのです。

田宮　そりゃむつかしい問題だね。

伏見　まあ、教育的なエレメントもあるし。

朝永　そりゃぼくは教育大学にいますから。……ただし教育といっても自分自身に対する教育的な面もある。
伏見　もちろん、そうでしょうね。
坂田　だから、そりゃ教育法によるわけでしょう。
朝永　教育法というとどういう意味ですか。
坂田　教えるべき真理と、その真理をあんまりはやく教えるとかえって困るということでしょう。
朝永　そう、文法はあることはあるのです。いっとう始めからやるのがいいかわるいか、どうかということです。
坂田　正しい真理でも、これを信条として公式的に適用されると、とかく逆の方向へ行きがちだ。
朝永　だから人をみて法を説けというつもりもあるのです。
伏見　坂田先生は、朝永先生の態度を、教育上の観点から、ぼかしておいたほうがいいという……。
坂田　ぼやかしておいていいとは思わない。真理は真理として教えるべきだと思うのです。とにかく、そういうものはまちがって適用されがちであるということはいえると思いますね。
伏見　公式的に表現してしまうとね……。それを表現する適当な言葉がないということですね。坂田先生自身は、その点に関しては……。
坂田　ぼくは、どうも教育大学でないものですから、教育的な考慮は払わない。

天才の役割

朝永　表現する言葉がないというと、以心伝心などということになるが、実は、以心伝心なんて、非合理的な

要素が論ぜられると、ぼくはいやなのですけれどもね、いまの物理学の段階では、やっぱり以心伝心的な要素が相当あると思うのです。せんに坂田君が物理学の発展に、天才が必要でなくなるような時代がくるということをいったことがあるでしょう。……坂田君は忘れてるかもしれないが、そういう時代が、やがてはくるであろうと思うのですけれどもね、それまでは……。

坂田　そうですかね……（笑）。

朝永　これは、少なくともそういう時代がくると、ノーベル賞がなくなっちゃうので……坂田君がもらったあとに、そういう時代がくるように希望する。

田宮　さっきの進化論に照らしてみて、そんな時代は絶対にこないと思いますよ。やっぱり少数の天才はいつになってもいますよ。次の時代を生むのはいつの時代だって少数者でしょう。

朝永　しかしたとえばニュートンという、あんな大きな人間は、あれ以来、絶対に出てこないでしょう。ああいう、ただひとりで、すべてのことをやるという天才が、天才的なコントリビューションをやったわけですね、昔は。ところがいまはかならずしもそうじゃないでしょう。非常に大勢な人の集まり、それのコントリビューションが個人的な天才のコントリビューションにくらべて、だんだんウェートが大きくなってゆくことが、どうも、実際の傾向らしくみえるのですけれどもね。

田宮　このあいだきたワイマンというハーヴァードの生体物理学者が、私にアメリカでどういう印象をうけたかと聞くのです。私はアメリカの科学はヒューマンウェーブ（人海戦術）だ、と答えてやりました。人海戦術の威力はたしかに私も認めますね。だけどそれだけじゃだめだと思うのです。

朝永　ヒューマンウェーブは、やっぱり指導者がなくっちゃ烏合の衆でしょう。しかしヒューマンウェーブが

あったうえの天才と、ない場合の天才と、天才の型がちがう。

田宮　それはちがいましょうね。

朝永　ヒューマンウェーブがある場合の天才というのは、そういう方法論というものを、ほんとに自覚した、坂田君みたいな人になりつつあるのですよ、方向として。いまそうだとはいわないですよ（笑）。

坂田　しかし直感とか、以心伝心とかいわれたのですが、合理的にできるものは、合理的にする必要はあるんじゃありませんか。それが全部なくなるということは、決してないわけですけれども。その時代において、最も合理的なところまでもっていっておく必要があるのじゃないでしょうかね。教育的な見地からも。

伏見　どうもありがとうございました。

（『現代自然科学講座』第四巻、一九五一年）

解説

牧 二郎

この巻に収められた論文（あるいはエッセイ）の多くが執筆された昭和二十二年から二十四年にかけての日々は、物理学者としての先生の活動が頂点をきわめた時代であった。五十篇をこえる先生の学術論文のうちの二十篇近くが昭和二十二、二十三年のわずか二年間のうちに発表されている。故木庭二郎博士をはじめとする多くの門弟と連名で書かれた論文も多いが、それにしても先生のあのほっそりとした風姿からは想像できぬほどの活潑な仕事ぶりである。いうまでもないことだが、これらの論文は後年ノーベル物理学賞の対象となった量子電磁力学の「くりこみ理論」ならびにそれと関連した研究の成果である。

本書のうちで、「原子論から素粒子論へ」と「量子力学的世界像」の二つはいずれも約五十頁にわたる長篇であるが、公刊の時期から推しておそらく昭和二十二年の前半に時期を接して執筆されたものであろう。この時期にはまた、先生の大著『量子力学I』の執筆も鋭意進められていたにちがいな

い（同書の序文は昭和二十三年二月付けとなっている）。そして「くりこみ理論」の研究がはじめられたのは論文受理の日付などから判断して、前記の二篇の脱稿後間もなくのことであったと推測される。

こうしたことを思いめぐらせながらこの両篇を読み直してみると、ここには《物理学者という人種がどんな奇妙な「もの」——ウェーヴィクル——の世界を持っているものか》を読者につたえようとする解説的意図をこえて、旧来の理論の困難ととりくんで物理学に新たな見通しをひらこうとする、先生の張りつめた問題意識と並々ならぬ意欲とがみなぎっているのをあらためて感じとることができるのである。

たとえば「量子力学的世界像」は、《理論物理学は今日一つの困難に出会って、何か根本的に考えを改めない限り我々は先に進むことができない。……》という緊迫した一文をもってはじめられ、電気素量や電子の質量のように今のところは単に形式的に理論の中にふくまれているだけの自然定数が、やがて《われわれに何か考え方の革命を命令するであろう》との予感にみちた終節でむすばれる。そして、量子の発見から量子力学の体系や場の量子論の紹介をへて現代の素粒子論の直面する問題にいたる十五節にわたる講述が、周到な論理的構成のもとにすすめられている。「朝永調」の丹念な、ゆったりした行文は、あたかも一歩一歩と山頂を目指して進む登山者の前に、量子力学の巨峰が、霧の晴間から次第にその《fascinating な》全容をあらわしてくるような雰囲気に誘われる。私は『基礎

科学』創刊号でこの論文を読んだが、十八歳の高校生には正直のところわからない箇所が多かった。にもかかわらず、これを読み終えたときの感動は今日でも忘れることができない。のみならず先生のこの講述は、私に量子論や素粒子論を学ぶための確固とした規準をあたえてくれるものであったのである。

他方「原子論から素粒子論へ」は、右の「世界像」とは対照的に、法則の説明よりはむしろ物質観――現代の原子論(アトミズム)――の展開に解説の重点がおかれている。そして現代物理学とその発展についての先生の考え方や認識論的考察にも相当な力が払われていることに特色がある。たとえば、物理学の対象はなぜ原子、原子核、素粒子といったミクロの世界に進んできたのか。先生は言う。

「われわれの目に見え、手に触れる現象を個々別々に取り扱っていた古い物理学から、これらを統一的に取り扱う十九世紀の原子論に移るとき、まず（色も温度もないような）「原子」という前段階の世界には存在しなかった新しい概念が導入された。……こういう新奇なものを導入しなければならなかった理由は、原子自身が色や温度を持ち、それが物に現われる色や温度と関係しているという考えでは、物の性質を矛盾なく統一的に理解することができないからである。」

そして、エーテルを捨てて「物理学的空間」が、通常の粒子概念を捨てて「ウェーヴィクル」（量子的粒子）が、という風に次々と《新奇の物》が登場する。こうしてわれわれが《次第に身近いありのままの自然から離れて行かねばならぬことは、ある意味では悲しいことかもしれない》、しかし《こ

れを行なわなければ自然は決して矛盾のない統一的な、しかも客観的な存在としてわれわれにはとらえられない》のである（本書一〇九—一一〇頁）。
先生のこの見方は、座談「物質とは何か」のなかでも一貫しており、哲学の三宅（剛一）、下村（寅太郎）両博士や同じ物理仲間の渡辺（慧）博士にたいする応答でさらに補われている。ちなみにこの「座談会」はこれだけで一冊のアテネ文庫にまとめられたものだが、わずか七三頁、定価三十円（昭和二十四年五月に弘文堂より初版）の珠玉のごとき小冊子であった。しかしその内容は豊富かつ新鮮なものであって、たとえば下村氏の《現在の素粒子も単に現在の段階で素粒子と考えられているだけ》なのか、あるいは《理論上それが最後のエレメントだと考えられるような根拠があるものか》という質問にたいして、先生は、素粒子といっても電子、光子、陽子などいろいろなものがあるが、それらが《みんな同じ意味のものか、あるものはもう不可分的かもしれないが、他のものはそうじゃないかもしれません。そういうことは、いまのところわからないというより仕方がない》と答える。陽子が（中性子や中間子などと共に）素粒子ではなく、クォークからできていることは、三十年を経た今日では常識になっている。また、量子力学で不確定性原理が出てきたことに関連して《物質をいままでのように人間を離れたものとしてみることはできない。すべて人間との相関関係にあるもので、それを観測者と被観測者とに分ける。そこに必ず不確定が出てくる》というような、物理学そのものの教えるところから外れた〝哲学的〟解釈にたいして、先生は容赦ない反論を加える。

「量子力学で因果律が成立しなくなったのは観測結果の間だけの話であって、だからといってそれを救おうと思わないでもいいではないですか」
「統計的にせよ何にせよ、成立しているその世界を物理学的の自然だと思えないのですか」
「……その答の仕方に、宇宙全体のシステムというものをもってきて、それで答になってますか」

という辺りには、先生には珍しく激しい調子さえ見られる（本巻二九六—三〇〇頁）。

座談といえば、もう一つの「科学と方法」（三〇九頁以下）も、同様に内容豊富なもので、今日の立場から読み返しても興味深い。ここでも観測者と〝全宇宙〟との関係が論じられているが、先生の次のような発言は、宇宙論ばやりの今日、あらためてそのつづきを伺ってみたい気持にかられる。

「量子力学で統計的な解釈をくだしていることには、（測定が）何回もくりかえされるとか、（対象が）いくつもあるということが必然的な前提になっているわけでしょう。宇宙全体は量子力学的に記述するということは、そもそも無理なんだ。」
「宇宙全体は空間的にも時間的にも全体とすると一回かぎりのもので、そうしたただひとつのものに統計的な解釈ということはいえないでしょう。そうじゃないでしょうか。」（三一九—三二〇頁）

＊

さて、本書のはじめにもどって「光子の裁判」についてふれておこう。発表の時期(昭和二十四年六月)からみて、これは「くりこみ理論」の建設が一段落したところで筆をとられたものらしく、これを楽しんで書かれたであろう先生の寛いだ雰囲気が読み手につたわってくる。それにしても被告「波乃光子」の常識を超えた奇妙な振舞いをめぐって検察官と弁護人との間にかわされる息づまるような応酬は、傍聴者(先生)の巧みな情景描写のもとで劇的な場面をくりひろげつつ、生彩に富んだ〝論理劇〟を構成し、そこに一分のゆるみもないのはさすがである。「量子力学的状態の重ね合せとその干渉」とか「測定による状態の収縮」といった、一般の人々の最もとりつきにくい量子論のポイントを、これほど徹底的にかみくだいて説明したものは内外を通じて稀れである。木庭博士が早速このエスペラント訳を試みられたというのもうなずける。なお、先生の『量子力学Ⅱ』第九章における量子力学的状態の説明も、これら基礎的な概念について厳密、懇切をきわめたものである。しかしながら、先生のこうした努力にもかかわらず、今日なお状態概念や確率波についての不正確な解釈が一部の人びとに行なわれているのは、残念なことである。たとえば、量子力学においては認識と対象、主観と客観との二元的な裁断がもはや成り立たぬ、といった主張をなす論者が、《確率波の考えによれば、(粒子は)いたるところに存在するのだけれども、ただし一定の確率で存在する》とのべるとき、それは先生が「光子の裁判」や『量子力学Ⅱ』の中で厳にいましめた誤解におちいっているのである。先生の言葉を用いれば

「ある状態において或る物理量が或る値を持つことの確率といったことの真の意味は、ある状態に居るところの量子力学系に対して、ある物理量を測定する実験を実施したとき、その測定の結果として或る値が得られることの確率、という意味に解すべき」（『量子力学II』、三一七頁、力点は原文のもの）

であって、量子的粒子に対しては、測定を実施しないで物理量の値を考えることは許されないからである。

はじめにもふれたように、本書に集められた論稿の大部分は昭和二十二年から二十四年にかけて書かれたものであるが、例外は「原子核の理論」（昭和十六年一月）と「史劇『ファウスト』風 中性子誕生の前夜（訳）」（昭和三十九年一月）の二篇である。前者は先生三十五歳の青年教授時代の作で、ここでは陽子や中性子を沢山ふくむ重い原子核を一種の液体になぞらえた模型（液滴モデル）の立場から、この種の原子核のもつさまざまの物理的性質が、巧みなイラストレーションをまじえて平明に解説されている。「核液」の統計熱力学的な取り扱いはライプツィッヒ留学時代の研究で、今日の「核物質」研究の先駆をなすものであった。なお、この解説的論文のなかで、ウラニウムの核分裂にまで言及されているのは、二年前、ヨーロッパでその発見のニュースを直接に聞いておられただけに当然であるとも言えようが、書かれた時期が太平洋戦争ぼっ発の年であることにある種の感慨を禁じえないものがある。

後者は、先生五十八歳、ノーベル賞受賞の前年にあたり、日本学術会議の会長をつとめておられた時期のものである。原作はもちろんドイツ語で、今日ニールス・ボーア研究所とよばれているコペンハーゲンの理論物理学研究所が、ボーアの原子模型提唱五十周年記念の催しのおりに、余興として参加者に配られたというパロディ風の戯曲である。原子模型の五十年記念とはいいながら、エーレンフェストのファウスト役に配するに、パウリをメフィストフェレスに見立てたこの作品は、その数年前(一九五八年)に没した物理学者パウリに捧げられた鎮魂曲(レクイエム)であるかのように、私には思われる。それほどに《時には人を挫折させたほど辛辣、かつ否定的な批判家で、しかもみずから善をなした》(訳者口上より)彼の強烈な個性がヨーロッパ理論物理学界におとした影は濃かったのであろう。パウリの物理学は、先生の学風からみるとやや鬼門の方角にあたる趣きがなくもないが、それなりに先生は他人を畏怖せしめるとともに誰からも愛されたというこの天才に、格別の関心を抱いておられたようである。この執筆者不詳の戯作(タイトルには「理論物理学研究所」突撃隊演出とあるが)には、このほか当のボーア(主の役)やディラックをはじめとして、量子力学の建設にあずかった様々の学者が登場し、それぞれの天才の個性や風貌が面白く描きわけられている。訳文は、先生らしい工夫を凝らした巧みなもので、表出力に富み、読んでいて興趣のつきないものがある。

*

かえり見ると、私が大学時代にお教えをうけた先生は、すでに数々の大業績をなしとげられた自信をたたえ、俗な表現でいわゆる円熟期にさしかかった壮年時代の先生であった。先生の学問と人間味とが一つに溶け合った本書の諸論文は、その明晰透徹に加えて初学者にたいする配慮にゆきとどいたもので、どの一つをとっても私にはこの時代の先生の風貌を最もよく伝えているように思われるのである。

以上、解題とも論評ともつかぬ内容になってしまったが、巻末の「解説」というものは、とくに本書のような場合には、先生の文章に接する以前に眺めていただく必要のなかったものである。この点をはじめにお断りするのを忘れた私の迂濶を読者におわびして筆をおくことにしたい。

朝永振一郎著作集　8

量子力学的世界像

1982年7月10日　第1刷発行
1986年5月 8 日　第4刷発行

発行者 北野民夫
発行所 株式会社 みすず書房 〒113 東京都文京区本郷3丁目17-15
電話 814-0131(営業) 815-9181(本社) 振替 東京0-195132
本文印刷所 三陽社
扉・口絵・函印刷所 栗田印刷
製本所 鈴木製本所

ISBN 4-622-00808-4